Agriculture et Agroalimentaire Canada
Agriculture and Agri-Food Canada

Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques (EPBH)

Résumé technique No 3

Volet modélisation hydrologique et modélisation intégrée

Examen quadriennal (2004/5 - 2007/8)





Pour obtenir des exemplaires additionnels de cette publication ou pour demander un exemplaire sur support de substitution, veuillez communiquer avec :

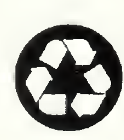
Service des publications du Ministère
Téléphone : 613-773-1444
Télécopieur : 613-773-1498
Courriel : publications@agr.gc.ca

Permission de reproduire

No de catalogue A22-500/4-2009F
ISBN 978-1-100-92528-8
No AAC 1[redacted]

Also available in English under the title : *Watershed Evaluation of Beneficial Management Practices (WEBs) Technical Summary #3 Hydrologic and Integrated Modelling Components Four-year review (2004/5 – 2007/8)*





10% de matières recyclées après consommation

11234F



Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques
à l'échelle des bassins hydrographiques (EPBH)

Résumé technique No 3

Volet modélisation hydrologique et modélisation intégrée

Examen quadriennal (2004/5 - 2007/8)

Agriculture et Agroalimentaire Canada 2010





Introduction

L'Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques (EPBH) est un projet national dirigée par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) qui compte Canards Illimités Canada parmi ses principaux partenaires financiers. L'EPBH a été lancée en 2004 pour mesurer la performance environnementale et économique de pratiques de gestion bénéfiques (PGB) sélectionnées à l'échelle des bassins hydrographiques. Des recherches sont menées sur sept sites de micro-bassin hydrographique à l'échelle du Canada (figure 1).



Figure 1: Emplacement des bassins hydrographiques visés par l'EPBH au Canada

Aux fins de la présente étude, une PGB se définit comme « une méthode agricole fondée sur des données scientifiques et conçue pour réduire au minimum les effets environnementaux potentiels, par exemple le ruissellement des sédiments et des nutriments vers les plans d'eau ».

Dans le cadre de l'EPBH, diverses PGB ont été utilisées sur chaque site et ont par la suite faites l'objet d'études sur leurs incidences environnementales et économiques à l'échelle des petits bassins hydrographiques (de 300 à 2 500 hectares). Le choix des PGB soumis aux essais dans le cadre de l'EPBH est notamment effectué en fonction des conditions particulières de chaque bassin hydrographique (tableau 1). Pour cette raison, la série de PGB choisies pour un bassin donné ne correspond par nécessairement aux pratiques mises en œuvre dans les autres bassins hydrographiques visés par l'EPBH.



Tableau 1 : PGB évaluées dans le cadre de l'EPBH, par bassin hydrographique

	PGB évaluées	Rivière Salmon	Rivière Lower Little Bow	Ruisseau Tobacco Sud/ Steppler	Nation Sud	Bras d'Henri/ Fourchette	Ruisseau Black	Ruisseau Thomas
Zone riveraine	Clôture d'exclusion pour les bovins (et abreuvement à l'écart des cours d'eau)	✓	✓		✓			✓
	Abreuvement à l'écart des cours d'eau (sans clôtures)		✓					
	Pâturage contre récolte mécanique			✓				
Champs	Gestion du fumier		✓			✓		✓
	Travail de conservation et travail classique du sol			✓				
	Rotation des cultures					✓		
	Couverture végétale permanente		✓	✓				
	Utilisation réduite d'herbicides					✓		
Ruissellement	Déviation et voies d'eau gazonnées						✓	
	Détournement d'eaux fluviales (ruissellement autour de la ferme)							✓
	Bassin de retenue (pour le purin)			✓				
	Petits réservoirs			✓				
	Bandes tampons		✓				✓	
	Suite de mesures de contrôle du ruissellement de surface					✓		
Drainage	**Drainage contrôlé par canalisations**				✓			

L'EPBH n'est pas un test des effets de PGB individuelles sur différents bassins hydrographiques aux conditions différentes*

* **Il est important de souligner que la comparaison des effets de PGB individuelles sur de multiples bassins hydrographiques et/ou l'évaluation d'une PGB quelconque sur un large éventail de bassins hydrographiques aux conditions différentes dépasse la portée de l'EPBH.**



Chacun des sept sites de bassin hydrographiques de l'EPBH dans l'ensemble du Canada comprend les composantes suivantes :

- Les *évaluations biophysiques* mesurent les répercussions d'une ou de plusieurs PGB sur la qualité de l'eau et sur d'autres agents environnementaux à l'échelle du bassin hydrographique.
- Les *évaluations économiques à la ferme* déterminent les coûts et les bénéfices de la mise en œuvre de PGB.
- La *modélisation hydrologique* aide à mieux apprécier les considérations générales et les interactions au sein des bassins hydrographiques, ainsi qu'à extrapoler les résultats vers d'autres sites.
- Sur deux des sites étudiés, la *modélisation intégrée* réunit des aspects hydrologiques, économiques et relatifs au comportement des agriculteurs en un outil multidimensionnel de prise de décision qui facilite la planification à long terme.

L'EPBH porte avant tout sur la qualité de l'eau, un indicateur relativement fiable d'autres incidences environnementales, par exemple la qualité du sol ou de l'air ou la biodiversité. Dans bien des cas, nous avons également examiné d'autres paramètres environnementaux tels que la santé du sol ou des zones riveraines.

L'historique de la santé et de l'évolution de chacun des sept sites de l'EPBH est généralement connu, grâce aux activités et à la collecte de données déjà réalisées par des associations locales de protection du bassin hydrographique ou des équipes multipartites. On prévoit de conserver ces sites comme référence à long terme à des fins de comparaison de la santé des bassins hydrographiques.

Le présent résumé technique est une compilation des résultats de la modélisation hydrologique réalisée dans six des sept bassins de l'EPBH au cours des quatre premières années du projet (2004/5 - 2007/8). Il comprend aussi un sommaire des deux projets pilotes de modélisation économie-hydrologie intégrée, au ruisseau Tobacco Sud (Manitoba) et à la rivière Bras d'Henri (Québec). Une compilation des résultats de la recherche biophysique menée dans le cadre de l'EPBH est disponible dans un document d'accompagnement distinct intitulé « Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques (EPBH), résumé technique no 1 : Volet biophysique – Examen quadriennal (2004/5 - 2007/8) ». Une compilation des résultats de la recherche économique, y compris un volet sur le comportement des exploitations agricoles [producteurs] et un rapport sur les métadonnées, est disponible dans un autre document d'accompagnement, intitulé « Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques (EPBH), résumé technique no 2 : Volet économique – Examen quadriennal (2004/5 - 2007/8)». Ces documents sont disponibles en format papier ou PDF, dans les deux langues officielles.

La publication d'un rapport-synthèse intitulé « Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques (EPBH) : Pour une planification améliorée du paysage agricole – Examen quadriennal (2004/5 - 2007/8) » donnant un aperçu du projet EPBH et résumant les conclusions de ces trois Résumés techniques, est disponible en format imprimé et en format PDF.

Pour obtenir de plus amples renseignements sur l'EPBH, veuillez consulter notre site Web au http://www.agr.ga.ca/EPBH ou nous envoyer un courriel à webs@agr.gc.ca.



Table des Matières

Liste des figures



Liste des tableaux





Modélisation hydrologique et modélisation intégrée aux fins de l'Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques dans six bassins hydrographiques du Canada

---

Rapport sur les progrès accomplis en matière de modélisation des bassins versants et d'évaluation des PGB pour l'Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques (EPBH I)

Préparé par : Brian T. Abrahamson
Février 2009



Sommaire

Les premiers résultats sont généralement bons à très bons dans les six bassins hydrographiques à l'étude, en particulier à l'exutoire du bassin, et les efforts initiaux de modélisation des impacts des PGB sont encourageants. Il faudra réaliser d'autres travaux pour obtenir des résultats assez cohérents afin de modéliser les sous-bassins de chaque bassin versant et pour évaluer les PGB au moyen des modèles. On a constaté quelques problèmes courants : l'inadéquation de certaines données, la brièveté des périodes de collecte de données et l'insuffisance actuelle de la capacité de modélisation en ce qui a trait aux processus qui se déroulent dans les bassins à l'échelle locale. Il serait possible de remédier à cette dernière lacune avec de meilleures données.

Les PGB mises à l'essai présentent des tendances conformes aux attentes; toutefois, en raison de problèmes associés au calage du modèle, les valeurs absolues sont contestables. Il faudra recueillir d'autres données pour effectuer une vérification. Le niveau de confiance associé à l'évaluation des PGB devrait augmenter avec la qualité des modèles de bassins versants.

Rivière Salmon - Les résultats des calages du modèle SWAT dans le bassin hydrographique de la rivière Salmon sont variés. Les conditions hydrologiques à l'exutoire étaient bonnes; cependant, les résultats obtenus aux points de prélèvement dans le cours d'eau varient de bons à médiocres. Il faudra trouver une explication à cette disparité. Faute de données, il n'a pas été possible de caler le modèle pour ce qui est de la charge en sédiments. Par conséquent, la modélisation des sédiments a été faite en fonction des débits calés et à partir des valeurs théoriques du modèle. On a par la suite exécuté le modèle afin de prévoir la qualité de l'eau (teneurs en azote et en phosphore), ce qui a donné des résultats très bons, ou à tout le moins raisonnables, à l'exutoire et des résultats variés aux stations d'amont. Il faudra effectuer d'autres travaux pour expliquer ces discordances. De plus, il y aurait lieu de réévaluer la qualité de l'eau une fois qu'on aura réussi à mieux caler la charge en sédiments.

L'évaluation des PGB s'est bornée à une analyse de sensibilité visant à déterminer l'impact de l'épandage d'engrais inorganiques et de fumier sur les apports d'azote à l'exutoire du bassin. À l'aide du modèle, on a estimé la quantité maximale d'engrais qui pouvait être épandue dans le bassin versant sans dépasser les recommandations de la Colombie-Britannique pour la qualité de l'eau à l'exutoire; cette méthode a été proposée en tant que PGB. Cette estimation se fonde sur l'hypothèse que les avantages économiques augmentent proportionnellement à l'épandage d'engrais.

Rivière Lower Little Bow - Le bassin versant de la rivière Lower Little Bow est situé sur un tronçon de cette rivière. La modélisation du bassin versant en est à un stade très préliminaire. Bien que les résultats soient prometteurs, il faut garder à l'esprit qu'on a utilisé les données de deux années seulement, ce qui empêche les chercheurs de prendre en compte les variations saisonnières et annuelles auxquelles on pourrait s'attendre dans ce bassin. Les efforts ont surtout porté sur la détermination du débit sortant dans le bassin versant et sur la mise à l'essai du fonctionnement du modèle pour l'irrigation. Le ruissellement en provenance du bassin versant a fait l'objet d'estimations mensuelles établies en soustrayant le débit entrant du bassin de son débit sortant.

Le second problème consistait à incorporer les impacts de l'irrigation sur le bassin versant. Le bassin reçoit de l'eau d'irrigation de deux sources : une source interne, la rivière Little Bow, et une source externe, le district d'irrigation du nord de Lethbridge (DINL). On ignorait la quantité d'eau provenant de chacune de ces sources au moment des récents exercices de modélisation; on ne savait pas non plus quelles parcelles de terre étaient irriguées par l'eau de chacune des sources. On devrait disposer de données supplémentaires sur l'eau d'irrigation pour la réalisation de l'EPBH II.

Ruisseau Tobacco Sud - Le bassin hydrographique du ruisseau Tobacco Sud fait l'objet de modélisations ou d'études depuis 15 à 20 ans. Plusieurs sous-bassins ont été instrumentés, notamment ceux des ruisseaux Twin et Steppler. Les résultats de modélisation pour les phases de calage et de validation à l'exutoire du bassin, près de Miami, ont été très bons. Les modélisateurs n'ont pas été en mesure d'obtenir d'aussi bons résultats dans les bassins versants expérimentaux, biens que ceux-ci se soient révélés prometteurs. Par exemple, lors de l'étude, le débit sortant des deux côtés du bassin du ruisseau Twin correspondait aux débits mesurés, avec un coefficient de Nash-Sutcliffe d'environ 0,5. Les valeurs obtenues dans le bassin du ruisseau Steppler sont plus basses; toutefois, elles indiquent toutes deux un bon niveau de corrélation entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées.



Les PGB ont été modélisées à partir de données recueillies dans le bassin hydrographique expérimental afin d'élaborer des modules portant sur des composantes particulières telles que le rendement des petits barrages, l'effluent des enclos à bestiaux ou l'impact du recours à des bassins de retenue pour contenir les déchets des enclos à bestiaux. Lorsque ces PGB étaient appliquées ailleurs dans le bassin hydrographique, on obtenait un avantage global assez bien défini dans le bassin du ruisseau Tobacco Sud. Il faudra mener d'autres travaux pour améliorer les modèles des sous-bassins. Les auteurs attribuent au moins en partie le problème de calage à l'incapacité du modèle SWAT à traiter correctement le ruissellement à la fonte des neiges et les événements d'infiltration. Il faudra peut-être aussi améliorer la résolution des données d'entrée.

Rivière Nation Sud - La modélisation du bassin hydrographique de la rivière Nation Sud vient tout juste de commencer.

Rivières Bras d'Henri et Beaurivage - Les bassins versants des rivières Bras d'Henri et Beaurivage font partie du bassin de la rivière Chaudière, qui fait l'objet de nombreux projets de modélisation depuis 15 ans. L'étude réalisée récemment dans le cadre de l'EPBH constitue un perfectionnement des études antérieures, en ce sens que les unités de réponse hydrologique (URH) servant à l'EPBH sont plus petites, ce qui améliore la résolution du modèle. De plus, cette échelle réduite correspond de plus près à la superficie moyenne des fermes du bassin versant, ce qui facilite le transfert des données et de l'information des modèles environnementaux à des modèles économiques capables de traiter les données à l'échelle de l'exploitation agricole.

En majeure partie, les calages hydrologiques de la rivière Bras d'Henri et de l'ensemble du bassin versant de la rivière Beaurivage ont été bien faits, et l'évaluation a produit de bons résultats. En revanche, les sédiments et la qualité de l'eau se sont avérés plus difficiles à évaluer. Les auteurs ont dû reporter les extrants relatifs aux sédiments et à la qualité de l'eau sur une échelle logarithmique afin d'établir une corrélation visuelle entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées. Il est donc très difficile d'utiliser cette information pour évaluer d'une façon fiable les impacts des PGB choisies, même si les résultats de l'évaluation des PGB semblent raisonnables. Il faudra donc réaliser d'autres travaux pour améliorer le calage du modèle de base. Il est fort probable que l'incapacité à obtenir un bon calage est attribuable, au moins en partie, au manque de données représentatives.

Ruisseau Black - Les résultats de modélisation des éléments de l'hydrologie, des sédiments et de la qualité de l'eau pour le bassin hydrographique du ruisseau Black sont très bons en général. Le modèle a été étalonné à l'aide de données antérieures à la mise en œuvre des terrasses de déviation et des voies d'eau gazonnées en 1995. Il a ensuite été validé au moyen de données postérieures à la mise en place des PGB. Pour évaluer ces PGB, on a mis au point des routines qui alimentaient le modèle en intrants donnant une approximation des PGB. Cela fait, le modèle a été en mesure de reproduire assez bien les données observées. Certains autres travaux seront nécessaires pour améliorer le fonctionnement du modèle événementiel des bandes riveraines gazonnées.

Ruisseau Thomas - Le calage du bassin versant du ruisseau Thomas ayant été effectué sur une très courte période de collecte (moins de deux ans), les résultats doivent être considérés comme étant préliminaires. Il faut disposer d'une période de collecte plus longue pour réaliser le calage et la validation. En outre, le manque de données représentatives, notamment les données pluviométriques, a posé certains problèmes, et on s'est inquiété de la capacité du modèle à simuler les processus d'un bassin versant de si petite taille.

Plusieurs PGB ont été évaluées, et les résultats étaient conformes aux attentes. Les travaux de la deuxième phase de l'EPBH devraient comprendre l'amélioration du calage des éléments du modèle relatifs à l'hydrologie, au transport des sédiments et à la qualité de l'eau, après quoi on pourra réaliser une autre évaluation des PGB.



Introduction

Sept bassins hydrographiques font l'objet d'une étude réalisée dans l'ensemble du Canada dans le cadre de l'Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques (EPBH). Cette étude comprend des programmes de terrain, l'élaboration de modèles permettant d'évaluer les pratiques de gestion bénéfiques (PGB) ainsi qu'une modélisation économique visant à déterminer les coûts et avantages de la mise en œuvre des PGB. Le présent rapport résume les résultats d'études sur la modélisation des impacts de la mise en œuvre des PGB dans *six* bassins hydrographiques et l'intégration des modèles hydrologiques et environnementaux aux modèles économiques pour deux de ces bassins hydrographiques.

Tous ces bassins sont situés dans des régions agricoles du Canada. Le tableau 2 contient une brève description de chaque bassin hydrographique. Les six bassins considérés dans le présent rapport sont ceux du ruisseau Thomas, du ruisseau Black, des rivières Bras d'Henri et Beaurivage, du ruisseau Tobacco Sud, de la rivière Lower Little Bow et de la rivière Salmon. L'emplacement approximatif de ces bassins versants est illustré à la figure 2. La modélisation intégrée a fait l'objet de recherches dans les bassins du ruisseau Tobacco Sud et des rivières Bras d'Henri et Beaurivage. L'étude de modélisation des eaux souterraines dans un septième bassin hydrographique de l'EPBH, celui de la rivière Nation Sud en Ontario, n'est pas incluse dans le présent examen.

Figure 2 : Emplacement des bassins hydrographiques de l'EPBH



Tableau 2 : Comparaison des bassins hydrographiques de l'EPBH

Bassin hydrographique	Caractéristiques physiques		Occupation du sol			
	Superficie (Km2)	Description	Terres agricoles cultivées %	Pâturages et fourrages %	Terres naturelles (forêts, arbustaies, herbaçaies)	Autres
Ruisseau Black	1.3		62	6	24	8
Bras d'Henri/ Beaurivage	167/ 742	Sous-bassin imbriqué	19	26	51	4
Rivière Lower Little Bow	34.0	Tronçon de la rivière Lower Little Bow	31	45	25	
Ruisseau Thomas	0.76	Le plus petit des bassins à l'étude	n/a	n/a	n/a	n/a
Rivière Salmon	1500	Bassin de montagne	8.3		91	0.7
Ruisseau Tobacco Sud	74.6	Trois zones distinctes : hautes terres, escarpement, plaines	59	12	25.4	3.6

Le bassin hydrographique du **ruisseau Black,** affluent de la rivière Little, est situé dans la partie nord-ouest du Nouveau-Brunswick, près de Grand-Sault. Sa superficie est de 1302 ha. Les principaux problèmes sont l'érosion et la piètre qualité de l'eau, attribuable en grande partie aux nutriments charriés par les sédiments.

Bassins des **rivières Bras d'Henri et Beaurivage** : Le bassin de la rivière Bras d'Henri est un sous-bassin du bassin versant de la rivière Beaurivage. Le premier a une superficie de 167 km^2; le second, de 742 km^2. Ces bassins versants sont situés dans le bassin de la rivière Chaudière, qui fait l'objet d'un grand nombre d'études depuis 15 ans. Le bassin de la Chaudière possède une densité de production de bétail parmi les plus fortes au Québec. L'étude actuelle constitue un prolongement des études antérieures.

Le bassin hydrographique de la **rivière Lower Little Bow** est tributaire d'un tronçon de la rivière Little Bow qui se trouve environ 40 kilomètres au nord de Lethbridge, en Alberta. Il occupe une superficie de 34 km^2. L'agriculture est la principale utilisation du sol; 47 % des terres agricoles sont irriguées. Les principales cultures sont les céréales (orge) et les plantes fourragères vivaces. Il s'agit d'un bassin versant marginal, en ce qu'il est situé dans une portion de la rivière Little Bow et que près de 90 % de l'eau qui s'écoule en aval de ce bassin versant vient d'en amont du bassin.

L'irrigation est un élément dominant du bilan hydrique. Les zones d'irrigation situées au nord de la rivière et au creux de la vallée sont alimentées par la rivière Little Bow, tandis que les secteurs au sud de la rivière sont alimentés par des sources situées à l'extérieur du bassin, dans le district d'irrigation du nord de Lethbridge.

Le bassin hydrographique du **ruisseau Thomas**, d'une superficie d'environ 760 hectares, est situé au nord du village de Berwick, dans la vallée de l'Annapolis, en Nouvelle-Écosse. Le ruisseau Thomas est un affluent de la rivière Cornwallis. Les principales utilisations des terres sont l'agriculture intensive et les ensembles résidentiels ruraux. Outre les arbres fruitiers, les baies et les légumes, on y trouve des cultures de maïs, de soja et de graminées[1].

Le bassin hydrographique de la **rivière Salmon**, qui se jette dans le lac Shushwap, est un bassin versant de montagne situé dans le centre-sud de la Colombie-Britannique, dans le bassin du fleuve Fraser. Il couvre une superficie totale de 1500 km^2, du cours supérieur jusqu'à l'exutoire près du bras Salmon. La principale occupation du sol est l'exploitation forestière, qui représente 91 % du bassin versant. L'agriculture occupe 8,3 % du bassin. L'utilisation intensive des sols, notamment l'agriculture avec ses applications croissantes d'engrais et de fumier, a eu un impact négatif sur la

[1] <www.nsfa-fane.ca/files/images/file/WEBS.pdf>.



qualité de l'eau, laquelle est devenu préoccupante pour les collectivités établies le long de la rivière Salmon et plus en aval.

Le bassin hydrographique **du ruisseau Tobacco Sud** est situé dans l'escarpement du Manitoba, près du village de Miami, environ 150 km au sud-ouest de Winnipeg. D'une superficie de 74,6 km^2, ce bassin est un tributaire de la rivière Morris, qui s'écoule dans la rivière Rouge, puis dans le lac Winnipeg. Environ 71 % du bassin est cultivé, et quelque 58 % des terres cultivées sont des cultures annuelles (surtout du blé et du canola), le reste se composant de cultures fourragères et de pâturages.

Méthodes de recherche

Les études de modélisation des bassins hydrographiques ont deux objectifs communs[1] :

1) simuler l'hydrologie et la qualité de l'eau du bassin versant dans les conditions existantes, au moyen d'un modèle hydrologique distribué;

2) à l'aide du modèle calé, évaluer l'efficacité des PGB appliquées dans le bassin versant afin de réduire l'impact des pratiques agricoles sur la qualité du ruissellement de surface dans le bassin. Deux des études comportaient un troisième objectif : fournir une méthode permettant d'intégrer les modèles environnementaux (GIBSI, SWAT) aux modèles socioéconomiques, soit les modèles de l'économie à la ferme et du comportement des exploitations agricoles, élaborés dans le cadre d'études distinctes pour les bassins versants des rivières Bras d'Henri et Beaurivage et du ruisseau Tobacco Sud.

Dans le présent rapport, la qualité de l'eau renvoie généralement à la charge en sédiments et en nutriments (azote et phosphore), à deux exceptions près. D'une part, on a modélisé le transport des coliformes et des pesticides associé à diverses PGB pour les bassins versants des rivières Bras d'Henri et Beaurivage au moyen de routines disponibles dans le modèle GIBSI; d'autre part, on a élaboré et mis à l'essai un modèle bactérien à partir des données de trois fermes d'élevage situées le long de la rivière Salmon.

Le modèle Soil and Water Assessment Tool (SWAT) du département de l'Agriculture des États-Unis[2] a servi de modèle principal pour cinq des bassins à l'étude, soit ceux des ruisseaux Black, Thomas et Tobacco Sud, de la rivière Lower Little Bow et de la rivière Salmon. Pour le bassin hydrographique des rivières Bras d'Henri et Beaurivage, on a utilisé le modèle GIBSI[3]. Les modèles effectuent des simulations continues des processus hydrologiques, des sédiments et de la qualité de l'eau sur un pas de temps journalier. La température, les propriétés du sol, la topographie, la végétation et les pratiques de gestion du sol sont les principaux intrants (Wanhong Yang, 2008). Le processus de modélisation des bassins versants est illustré à la figure.

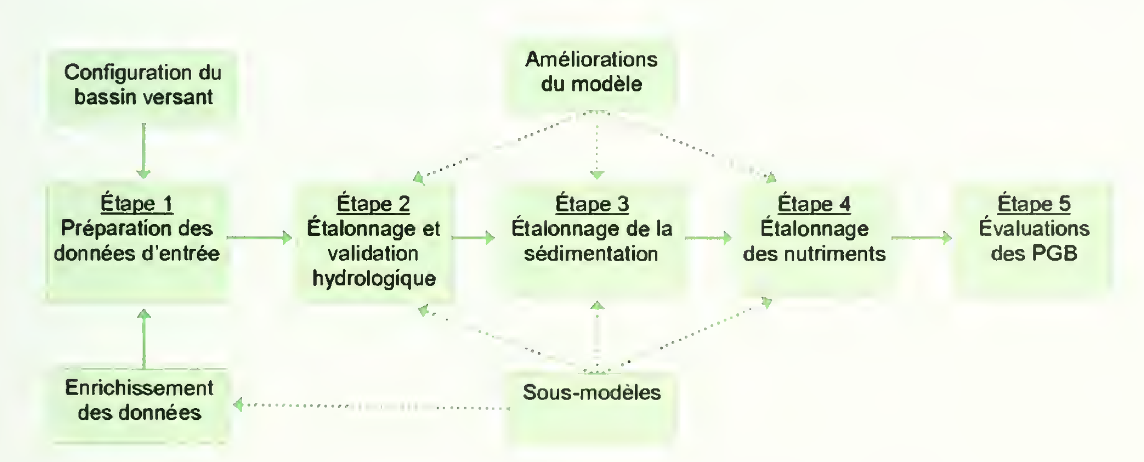


Figure 3 : Processus de modélisation de l'EPBH (gracieuseté de Brian Abrahamson)

[1] Cette généralisation vise à saisir l'essentiel des objectifs de chaque étude, lesquels peuvent être formulés un peu différemment d'une étude à l'autre.

[2] Le modèle SWAT a été mis au point par le Natural Resources Conservation Service du département de l'Agriculture des États-Unis.

[3] Gestion intégrée par bassin versant à l'aide d'un système informatisé.



Il a parfois fallu une capacité de modélisation additionnelle soit pour générer les données d'entrée du modèle SWAT, soit pour analyser les processus que ce modèle n'était pas en mesure de traiter d'une façon satisfaisante, notamment les impacts des PGB structurales. Il s'agissait entre autres de modéliser les impacts des petits barrages, des bassins de retenue servant à contenir le ruissellement des enclos à bestiaux et des terrasses de déviation, de même que ceux d'éléments d'aménagement paysager telles les bandes riveraines gazonnées. On a également eu de la difficulté à modéliser le ruissellement et la qualité de l'eau à la fonte des neiges ainsi que les épisodes de ruissellement de courte durée

Lorsqu'il fallait ajouter une capacité supplémentaire, les modélisateurs ont d'abord tenté d'utiliser ou d'adapter un modèle existant. Si cette solution ne fonctionnait pas, on développait alors un nouveau modèle ou une nouvelle routine de modélisation. La question des modèles auxiliaires est approfondie dans les paragraphes qui suivent.

La capacité existante du système GIBSI suffisait à répondre à la plupart des besoins de modélisation actuels pour le bassin versant des rivières Bras d'Henri et Beaurivage. Le modèle GIBSI avait déjà servi à modéliser le débit et la qualité de l'eau à divers endroits du bassin versant de la Chaudièr.

Modélisation des bassins versants

Données et configuration du bassin versant - Une fois établis les objectifs de la modélisation, la première étape consiste à préparer les données d'entrée. Cette activité comprend le choix de la période à modéliser, la conversion des données existantes en un format utilisable par le modèle, le choix de données représentatives, le comblement des données lacunaires et la définition de la configuration du bassin versant au moyen d'un modèle altimétrique numérique. Normalement, les précipitations sont saisies sur une base quotidienne, bien qu'on puisse aussi utiliser des valeurs subquotidiennes.

Le SIG sert à définir les limites des bassins versants, à configurer le drainage et à délimiter les unités géographiques aux fins de l'analyse hydrologique. Pour le modèle SWAT, le bassin versant est divisé en sous-bassins, en tronçons et en unités de réponse hydrologique (URH). Au lieu de l'URH, le GIBSI emploie l'unité hydrologique relativement homogène (UHRH). Ces deux unités représentent des zones ayant une performance hydrologique similaire et choisies en fonction de l'occupation du sol, du type de sol et de la topographie (pente).

Calage et validation du modèle de bassin versant - L'étape suivante consiste à caler et valider le modèle afin de simuler le ruissellement ainsi que le transport des sédiments et des nutriments à l'exutoire et à certains points intermédiaires du bassin versant. La procédure normalisée de calage d'un modèle de bassin versant[1] est décrite dans le mode d'emploi du modèle SWAT (*SWAT User's Manual 2000*); elle consiste à modéliser, dans l'ordre, les processus hydrologiques, les sédiments et la qualité de l'eau (étapes 2 à 4 de la figure 3). Le modèle validé peut alors servir à évaluer les PGB (étape 5 de la figure 3).

On choisit un ensemble de données connu pour caler et valider le modèle. Le mode d'emploi du modèle SWAT recommande de diviser l'enregistrement en trois périodes, tel qu'indiqué à la figure 4. La première période est une étape de démarrage, qui réduit l'impact des erreurs éventuelles d'estimation des conditions initiales. (Cette période n'a été mise en application que pour le bassin hydrographique du ruisseau Tobacco Sud.) Les deux autres périodes servent respectivement au calage et à la validation du modèle.

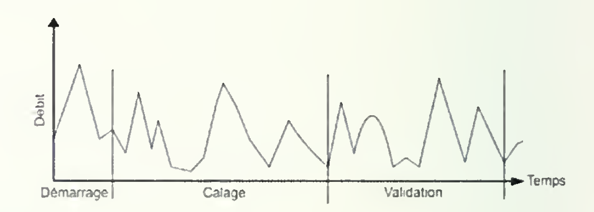


Figure 4 : Étapes de l'élaboration d'un modèle de bassin versant

Hydrologie - On effectue d'abord le calage des processus hydrologiques dans le bassin versant. Le mode d'emploi du modèle SWAT recommande de distinguer le débit de base du ruissellement et de caler chaque élément du ruissellement séparément, bien que cela ne soit pas toujours nécessaire. Les principales données d'entrée sont les précipitations, la température et les paramètres de débit qui définissent les processus hydrologiques tels que la quantité et le débit du ruissellement, la fonte des neiges, l'infiltration et l'eau évacuée dans des eaux souterraines.
Le calage du modèle se fait en rajustant les paramètres de débit jusqu'à ce que les débits

[1] Les procédures applicables aux modèles de base SWAT et GIBSI sont similaires.



sortants simulés du bassin correspondent de près au débit sortant mesuré pour ce qui est de l'ampleur, du volume et du moment. Après le calage, on valide le modèle en l'exécutant pour une deuxième période avec les données pluviométriques de cette période. Il faudra peut-être rajuster certains paramètres du modèle à ce stade afin de tenir compte des effets des changements survenus dans le bassin versant, notamment l'emmagasinement des eaux, la mise en œuvre de PGB ayant une incidence sur le débit ou les changements d'occupation du sol. Par exemple, la mise en place de terrasses de déviation et de voies d'eau gazonnées dans le bassin hydrographique du ruisseau Black a eu une incidence sur les débits de ce bassin versant au cours de la période de validation.

Sédiments - L'étape suivante consiste à modéliser les processus sédimentaires à partir du modèle dont on a déjà effectué le calage pour simuler l'hydrologie. On rajuste les paramètres qui influent sur la sédimentation, soit l'érosion à la surface du sol et dans le chenal. Les processus d'érosion à l'échelle du bassin versant dépendent beaucoup de l'exactitude du débit simulé. À leur tour, les estimations des sédiments ont un impact majeur sur le transport du phosphore en provenance du bassin versant.

Qualité de l'eau - La troisième étape consiste à modéliser la qualité de l'eau, c'est-à-dire, habituellement, la teneur en diverses formes d'azote et de phosphore. On a également modélisé les pesticides (atrazine) et les coliformes fécaux dans le cas du bassin versant des rivières Bras d'Henri et Beaurivage, tandis qu'un modèle bactérien a été mis au point pour le bassin de la rivière Salmon.

Évaluation des résultats de modélisation - Diverses méthodes graphiques et statistiques ont servi à évaluer la qualité des résultats de modélisation. Les méthodes graphiques telles que l'hydrogramme défini par points permettent de vérifier visuellement la qualité de l'ajustement, tandis que le traçage des distributions statistiques indique si les résultats simulés concordent avec la distribution statistique des données mesurées. Les mesures statistiques les plus courantes sont le coefficient de détermination (R^2) et le coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (CNS). Parmi les autres mesures employées, on retiendra le biais en pourcentage et l'erreur quadratique moyenne (EQM). On trouvera une analyse approfondie des critères d'évaluation à la section 4.

Évaluation des PGB

Au cours de l'étape finale, le modèle calé et validé sert à évaluer les impacts des PGB sur la qualité de l'eau de surface à l'exutoire du bassin et, parfois, à quelques points intermédiaires. Les PGB comprennent des modifications apportées aux pratiques de gestion de l'occupation du sol, notamment la réduction de l'application d'engrais et de pesticides, le remplacement d'engrais azotés par du fumier, la réduction du travail du sol, la conversion de cultures annuelles en cultures fourragères pérennes et la plantation de bandes riveraines, de même que la mise en œuvre de mesures structurales telles que les terrasses de déviation et les bassins de rétention des eaux de ruissellement. Les modèles SWAT et GIBSI ont tous deux la capacité interne de prendre en considération bon nombre de ces changements, en particulier les modifications non structurales à l'occupation du sol. Par exemple, on peut modéliser l'impact de la conversion aux cultures fourragères en sélectionnant comme type d'occupation du sol la culture fourragère au lieu de la culture céréalière.

Autres modèles ou améliorations aux modèles

Quelques modèles ou routines supplémentaires ont été mis au point afin de préparer les données d'entrée au modèle ou d'évaluer des PGB. Par exemple, un modèle événementiel a été élaboré pour évaluer l'impact des bandes riveraines gazonnées dans le bassin versant du ruisseau Black. Pour ce même bassin, on a mis au point un modèle neuronal artificiel (MNA) pour estimer les paramètres de drainage du sol à partir de données à faible résolution qui ressemblaient beaucoup à celles qu'on pouvait obtenir en utilisant des données à plus haute résolution. Les modèles utilisés dans chaque bassin hydrographique sont indiqués au tableau 3 et traités plus en détail dans les paragraphes qui suivent.

Intégration aux modèles économiques

Pour qu'on puisse échanger des données entre les modèles environnementaux et économiques, il faut qu'elles aient des échelles temporelles et spatiales semblables. Les échelles temporelles ne posent pas de problème, car il est possible de cumuler les données des modèles environnementaux afin de produire les données annuelles requises par les modèles économiques. L'intégration spatiale est plus difficile à réaliser, car les modèles environnementaux sont construits à l'échelle d'unités hydrologiques, tels le bassin versant ou le tronçon d'un cours d'eau, qui ont toutes des limites naturelles, tandis que les modèles économiques sont construits à l'échelle de la ferme, dont les limites sont établies par des humains, qu'il s'agisse



Tableau 3 : Sommaire des modèles[1] ou améliorations de modèle ayant servi aux études des bassins hydrographiques dans le cadre de l'EPBH I

Bassin hydrographique/ Modèle principal	Modèles/modules/ améliorations	Fonction
Ruisseau Black/SWAT	Modèle des terrasses de déviation	Estimation du facteur P
	Modèle événementiel des bandes riveraines gazonnées	Modélisation de l'impact hydrologique des bandes riveraines gazonnées
	MNA des caractéristiques de drainage du sol et du carbone organique du sol	Estimation des paramètres du sol à partir de données pédologiques à faible résolution
Rivière Lower Little Bow/SWAT	Routine d'autocalage	Sélection des paramètres hydrologiques
Rivière Salmon/SWAT	Modèle bactérien	Simulation du transport de coliformes fécaux et d'*E. coli* associé à l'élevage du bétail
	Module hydrologique (élément du modèle bactérien)	Estimation du ruissellement consécutif à un épisode de pluie
Ruisseau Tobacco Sud/SWAT	Modules d'emmagasinement à petite échelle	Rétention du ruissellement des parcs d'engraissement
	Autocalage	Calage des paramètres
	Équivalent du modèle REMM	
Ruisseau Thomas/SWAT	s.o.	s.o.
Rivières Bras d'Henri et Beaurivage/GIBSI	SIG PHYSITEL	Délimitation et réseaux hydrographiques du bassin versant
	TransPath	Couplage avec le modèle GIBSI pour simuler le transport des pathogènes (coliformes fécaux) du pâturage au cours d'eau

du bornage des fermes ou des limites d'entités politiques telles que le canton, le district agricole ou la province. Les équipes de modélisation des bassins versants des rivières Bras d'Henri et Beaurivage et du ruisseau Tobacco Sud ont, chacune de leur côté, proposé une méthode permettant de résoudre le problème de l'échelle spatiale.

Rivières bras d'Henri et Beaurivage -
On a réalisé l'intégration spatiale en rajustant la taille de l'unité spatiale de base servant au système de modélisation GIBSI, l'unité hydrologique relativement homogène (UHRH), pour la rapprocher de la dimension des fermes de la région, soit de 50 à 105 ha. On a ainsi pu produire des données à l'échelle de la ferme dans chaque UHRH au moyen du modèle environnemental, cumuler les données au besoin et les transférer dans le modèle économique[2].

Ruisseau Tobacco Sud - On a élaboré une interface logicielle qui facilite l'échange d'information entre le modèle hydrologique et les modèles économiques (économie à la ferme et comportement des exploitations agricoles) élaborés pour le bassin versant du ruisseau Tobacco Sud. Cette interface utilise une routine fondée sur ArcGIS par laquelle des tables de recherche servent à convertir les données hydrologiques à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique (URH) en données à l'échelle de la terre ou de la ferme utilisables par les modèles socioéconomiques. À l'inverse, la routine permettra aussi de transposer les données utilisées ou produites par les modèles économiques à l'échelle des URH, qu'emploie le modèle hydrologique.

[1] Selon le cas, ces modèles ont été utilisés directement dans le modèle SWAT ou ont servi à fournir des intrants à celui-ci, à l'exception du modèle bactérien élaboré pour le bassin versant de la rivière Salmon.

[2] Les études socioéconomiques sur le bassin versant des rivières Bras d'Henri et Beaurivage sont menées par des équipes de l'Université Laval et de l'Université McGill.



Cette interface peut servir à élaborer et à mettre à l'essai des scénarios de PGB, décrits dans le Modèle du comportement des exploitations agricoles[2] par exemple, en entrant les données requises pour modifier les pratiques de gestion dans chacune des parcelles de terre touchées. L'interface convertira l'information de manière à permettre l'évaluation des avantages du scénario au moyen du modèle hydrologique.

L'interface n'est pas encore achevée; il reste à élaborer les modules de l'économie à la ferme et du comportement des exploitations agricoles. Si le développement de l'interface se déroule comme prévu, les chercheurs et les gestionnaires de la conservation auront à leur disposition un outil précieux et même convivial, doté d'écrans d'entrée graphiques et de menus déroulants.

Considérations particulières sur la modélisation de chaque bassin versant

Ruisseau Black - Deux PGB, soit les terrasses de déviation et les bandes riveraines gazonnées, ont été mises en œuvre dans le bassin hydrographique du ruisseau Black à partir de 1995, ce qui coïncidait avec le début de la période de validation (1995-2005). Par conséquent, la validation du modèle a dû tenir compte de l'impact de ces PGB. Les routines de modélisation décrites au tableau 3 ont été élaborées afin de fournir de l'information permettant de simuler l'impact des PGB.

On a mis au point des modèles neuronaux artificiels (MNA) aux fins de cette étude, en vue de simuler la texture du sol, la catégorie de drainage du sol et la teneur en carbone organique du sol dans le bassin versant, à partir de données dérivées de cartes des PPC[3] à faible résolution, qu'il est facile de se procurer. Les extrants du MNA correspondaient bien aux cartes à plus haute résolution disponibles pour ce bassin versant. Les MNA pourraient permettre de produire des cartes plus précises pour extrapoler les résultats de l'étude à d'autres bassins versants.

Aucun modèle convenable n'était disponible pour l'analyse directe des impacts des PGB, c'est-à-dire les terrasses de déviation et les bandes riveraines gazonnées, à l'échelle du bassin. Les auteurs de cette étude ont franchi les premières étapes en vue de combler cette lacune en élaborant un modèle de déviation du débit et un modèle événementiel des bandes riveraines gazonnées. Le modèle des terrasses de déviation a été élaboré afin d'estimer un facteur de conservation pédologique (facteur P[1]) pour des terrasses de déviation espacées par différents intervalles. Le modèle événementiel des bandes riveraines gazonnées (GBSMOD) a été mis au point afin de simuler le débit et le mouvement des masses de sédiments sur les bandes riveraines gazonnées, tandis que le modèle de gestion des écosystèmes riverains (REMM) a été jugé impropre aux processus de simulation dans les voies d'eau gazonnées, et les études documentaires n'ont pas révélé de solution de rechange adéquate.

Rivières Bras d'Henri et Beaurivage - Ces bassins versants avaient déjà fait l'objet d'une modélisation dans le cadre d'une étude sur l'ensemble du bassin de la Chaudière. On peut comparer les résultats de la présente étude à ceux des études antérieures, ce qui permet une vérification supplémentaire de la qualité du modèle. Les deux études se distinguent notamment par le fait que la taille des UHRH est plus petite dans l'étude en cours, ce qui donne une définition plus précise des caractéristiques des bassins versants, de même qu'une URH dont la taille se rapproche beaucoup de celle des fermes.

Le SIG PHYSITEL a servi à préparer la délimitation et le tracé du réseau hydrographique utilisé dans le modèle. L'unité spatiale de base du modèle hydrologique est l'UHRH, dont la superficie varie de 50 à 105 hectares, soit la dimension approximative des fermes de la région. Les UHRH ont été groupées en grappes lorsqu'il n'y avait pas assez de données pour affecter des attributs uniques à chaque unité. Les UHRH de la rivière Bras d'Henri ont été regroupées en grappes aux fins de la modélisation hydrologique par HYDROTEL.

Rivière Lower Little Bow - La présente étude du bassin hydrographique de la rivière Lower Little Bow s'est attardée à déterminer le débit marginal et à incorporer au modèle l'irrigation de sources intérieures et extérieures. Elle avait pour objectifs particuliers de délimiter les zones d'irrigation et d'incorporer les pratiques d'irrigation au modèle hydrologique et le caler en conséquence (Rahbeh, 2008). La modélisation a pour objectif de simuler l'apport marginal tout en tenant compte de l'irrigation.

Faute de données disponibles pour modéliser avec précision les pratiques d'irrigation, le calage du

[2] Les études socioéconomiques sur le bassin versant du ruisseau Tobacco Sud sont menées par une équipe de modélisation de l'Université de l'Alberta.
[3] Pédo-paysages du Canada.

[1] Le facteur P est le rapport entre l'érosion du sol avec et sans l'application de pratiques de conservation du sol.



modèle a été effectué en fonction de trois scénarios : 1) aucune irrigation, 2) une irrigation illimitée; 3) une irrigation à dates fixes. Une routine de calage automatique a été mise au point pour caler les paramètres hydrologiques du modèle SWAT.

Estimation du débit sortant du bassin versant
Comme le bassin versant est un tronçon de la rivière Little Bow et que des mesures du débit étaient disponibles en amont et en aval, on a estimé le ruissellement en provenance du bassin versant (ΔQ) en soustrayant le débit mesuré à la station d'amont du débit enregistré à la station d'aval pour la période 2004-2006.

$$\Delta Q = Q_{aval} - Q_{amont} \text{ -------- } \quad (1)$$

Rivière Salmon
L'étude de ce bassin versant a fait l'objet de certaines considérations particulières :

a) En l'absence de données sur les sédiments, la charge en sédiments a été simulée à l'aide du modèle SWAT; on a utilisé les débits calés et des valeurs théoriques (tirées de la documentation du modèle SWAT) comme paramètres des sédiments, en comptant obtenir des résultats raisonnables grâce à l'étroite relation entre le débit et le transport des sédiments.

b) On a élaboré un modèle bactérien autonome pour le bassin versant de la rivière Salmon, afin de simuler le transfert des coliformes fécaux et des bactéries *E. coli* des sources à la rivière, compte tenu des processus hydrologiques, des effets du climat et des pratiques de gestion en vigueur dans le bassin versant.

c) L'étude a proposé et mis à l'essai un processus par lequel les extrants de qualité de l'eau du modèle servent à élaborer des PGB propres à maximiser le rendement économique tout en gardant l'exportation des nutriments vers l'eau de surface en deçà des recommandations pour la qualité de l'eau. Essentiellement, cette procédure a servi à déterminer la quantité maximale de fumier et d'engrais inorganiques qu'on pourrait épandre sans dépasser les recommandations pour la qualité de l'eau à l'exutoire du bassin. Cet exercice se fondait sur l'hypothèse que le rendement économique est directement proportionnel à la quantité d'engrais épandu.

Ruisseau Tobacco Sud - Les auteurs de l'étude disposent d'un ensemble de données très complet obtenu au cours de plus de 15 ans d'étude intensive du bassin. Des données sur le débit, les sédiments et la qualité de l'eau étaient disponibles pour deux emplacements des tronçons inférieurs (dont un à l'exutoire) du ruisseau Tobacco Sud, de même qu'en plusieurs endroits des secteurs d'amont, soit dans le bassin versant du ruisseau Steppler et aux points de prélèvement de l'étude sur les bassins jumélés.

Pour caler le modèle, on a tenu compte des PGB existantes, soit 27 petits barrages et diverses pratiques de gestion de l'occupation du sol. On a ensuite validé le modèle sur deux périodes, en considérant chaque fois les PGB en vigueur au cours de la période; pour la première période de validation, les PGB étaient les mêmes que pour le calage. Un bassin de retenue et une zone de gestion du pâturage s'ajoutaient pour la seconde validation. Cet exercice est devenu le scénario de référence pour la mise à l'essai des PGB.

Le ruisseau Tobacco Sud est le seul des bassins versants de l'EPBH I où sont évalués les petits barrages et les bassins de retenue. Les chercheurs ont investi des efforts considérables dans le prétraitement des données et l'élaboration de méthodes permettant de simuler les impacts des PGB; ils ont notamment développé des relations entre la superficie de stockage et le volume pour les petits barrages, une table permettant de localiser les charges de source ponctuelle associées aux enclos à bestiaux, de même qu'une interface du SIG entre les modèles SWAT et REMM pour la modélisation des bandes riveraines.

Ruisseau Thomas - Le modèle SWAT a servi à caler le débit sortant, ainsi que les exportations de sédiments et de nutriments (phosphore et azote) du bassin versant pour la période d'avril 2005 à février 2006. En raison de la brièveté de la période de collecte, ce sont des données journalières qui ont servi à comparer les extrants simulés et mesurés. Le modèle n'a pas été validé.

On a mobilisé des efforts considérables pour sélectionner et préparer les données disponibles et utilisables dans le modèle SWAT. Il a fallu interpréter des données sur le sol et l'occupation du sol pour les convertir des formats existants en formats compatibles avec le modèle SWAT. Il a également fallu construire une série temporelle continue de la charge en sédiments, à partir d'échantillons instantanés et composites et de données sur l'écoulement fluvial. Une analyse de sensibilité a permis aux chercheurs de relever les paramètres les plus sensibles.



Résultats par bassin versant

Le calage des modèles de bassins versants a été effectué pour chacun des six bassins de l'EPBH I, et les modèles ont servi à estimer l'impact des PGB sur la qualité de l'eau dans cinq de ces bassins, soit ceux du ruisseau Black, des rivières Bras d'Henri et Beaurivage, du ruisseau Tobacco Sud, de la rivière Salmon et du ruisseau Thomas. La capacité du modèle à évaluer une PGB dépend de la qualité du calage du modèle. En outre, l'EPBH I comportait l'étude de l'intégration du modèle hydrologique et des modèles économiques des bassins versants des rivières Bras d'Henri et Beaurivage et du ruisseau Tobacco Sud. Les résultats du calage du modèle et de la mise à l'essai des PGB pour chaque bassin hydrographique, de même que les résultats des exercices de modélisation intégrée, sont présentés dans les sections qui suivent.

Ruisseau Black

L'étude du bassin hydrographique du ruisseau Black portait sur la période de 1992 à 2005. Des terrasses de déviation et des voies d'eau gazonnées ont été aménagées à partir de 1995. Les données ont donc été séparées en deux périodes : avant (1992-1994) et après (1995-2005) la mise en œuvre des PGB. Puis on a modélisé le bassin versant pour ces deux périodes.

Calage du modèle antérieur aux PGB (1992-1994) - Le calage initial du modèle a été effectué pour la période de 1992 à 1994, qui correspond à l'état du bassin versant avant la mise en œuvre des PGB. Les débits mensuels simulés correspondaient aux débits mesurés (R^2 : 0,91; CNS : 0,88). Le modèle a légèrement sous-évalué la production de sédiments au début de l'été (juin et juillet 1992 et 1994) et l'a surévaluée à la fin de l'été (d'octobre à janvier, les trois années), pour un R^2 de 0,50 et un CNS négatif.

Les résultats relatifs à la qualité de l'eau sont mitigés. Les charges en nitrate étaient beaucoup plus élevées que les valeurs mesurées, et le modèle a donné pour chaque année deux pics de charge qui ne se sont pas produits au cours de la période de collecte. À la fonte des neiges, les charges maximales en NO_3-N étaient prévues environ un mois plus tard que les pics observés. Les coefficients R^2 et de Nash-Sutcliffe étaient tous deux près de zéro. La simulation de la charge en phosphore a donné de bien meilleurs résultats, malgré une surprévision des charges estivales et de celles du mois d'octobre semblable aux résultats des simulations de la production de sédiments. Comme pour les nitrates, le modèle a donné un pic de phosphore au printemps, au moment de la fonte printanière. Les valeurs de R^2 et du CNS étaient juste au-dessus de 0,80, ce qui indique une très bonne adéquation entre les valeurs de phosphore simulées et mesurées.

Nouveau calage pour la période postérieure aux PGB (1995-2005) - La première simulation effectuée après le calage du modèle portait sur la période de 1995 à 2005, pour laquelle on présumait que les PGB étaient en place. Le modèle calé a surévalué les débits et la charge en sédiments. On a attribué cet écart à l'absence de toute prise en considération des PGB. Les chercheurs ont exécuté une deuxième simulation après avoir rajusté le modèle pour qu'il tienne compte de l'effet des terrasses de déviation. Le modèle a continué de surévaluer les débits et la charge en sédiments. Une troisième simulation a été effectuée avec un taux d'infiltration accru, afin de tenir compte de l'atténuation du débit par les bandes riveraines gazonnées. Ces modifications ont permis d'obtenir une bonne correspondance entre les valeurs produites et les valeurs mesurées du débit et de la charge en sédiments. Les nutriments n'ont pas été modélisés.

Pratiques de gestion bénéfiques - L'étude a pris en considération deux PGB qui sont actuellement mises en application dans le bassin versant : les terrasses de déviation et les voies d'eau gazonnées. D'après l'hypothèse générale de l'étude, ces PGB pourraient s'appliquer à l'ensemble des régions de culture de la pomme de terre.

Analyse par scénarios des terrasses de déviation. On a entrepris une analyse dans le but d'estimer les impacts :

1) de la protection d'une proportion accrue du bassin versant par des ensembles de terrasses de déviation;
2) d'une modification de la distance entre les terrasses de déviation. Le modèle d'évaluation des terrasses de déviation a servi à estimer le facteur des pratiques de conservation du sol (facteur P). On a élaboré des tables mettant le facteur P en correspondance avec la pente et l'intervalle entre les terrasses.

Cette information a servi à développer un nouvel ensemble d'URH en fonction de la pente, du type de sol et de l'occupation du sol. On a ensuite exécuté le modèle SWAT d'après plusieurs scénarios fondés sur la proportion de la superficie protégée par des terrasses de déviation et sur différents intervalles entre les terrasses. Les



résultats indiquent que la réduction de la charge en sédiments peut atteindre 75 % et celle de la charge en phosphore, environ 57 % si on fait passer à 100 % la proportion de la superficie protégée par les terrasses de déviation. En revanche, l'augmentation de la charge en azote peut atteindre jusqu'à 44 % avec la protection d'une superficie maximale. Cette augmentation est conforme aux ouvrages publiés sur le sujet.

Comme nous l'avons vu plus haut, aucun modèle ne permettait d'évaluer adéquatement les impacts des bandes riveraines gazonnées. Il a donc fallu élaborer un modèle événementiel des bandes riveraines gazonnées. Ce modèle a été mis à l'essai sur trois événements de tempête; la simulation de deux de ces trois événements a été réussie ($R^2 > 0,9$). La valeur de R^2 pour le troisième événement se situait à 0,42.

Rivières Bras d'Henri et Beaurivage

Calage du modèle - Le bassin versant de la rivière Beaurivage avait déjà été modélisé dans le cadre d'études sur le bassin de la Chaudière; la rivière Bras d'Henri avait alors été incluse dans le bassin versant de la Beaurivage. Aux fins de la présente étude, la rivière Bras d'Henri a été modélisée d'abord en tant que sous-bassin distinct, puis dans le contexte du bassin versant de la Beaurivage.

L'étude a été réalisée à l'aide du système de modélisation GIBSI, qui comprend un SIG, un modèle hydrologique (HYDROTEL) et des modèles du transport terrestre et aquatique des sédiments, des nutriments, des pesticides et des pathogènes. Le modèle HYDROTEL a permis de simuler de façon satisfaisante les débits sortants des bassins versants des rivières Beaurivage et Bras d'Henri, malgré une tendance à sous-estimer le ruissellement printanier et l'absence de certains épisodes de crue ou de décrue, sans doute attribuable au manque de données pluviométriques représentatives. En outre, le modèle n'a pas réussi à reproduire l'effet des drains dans le bassin de la rivière Bras d'Henri, ce qui a entraîné une sous-estimation des débits estivaux.

Les résultats de la modélisation ont fait l'objet d'une évaluation approfondie, réalisée à l'aide de techniques statistiques et graphiques, et d'une comparaison mensuelle, annuelle et pour la saison d'étiage. Cette étude est la seule à avoir examiné particulièrement la performance du modèle dans les conditions d'étiage estivales. Les coefficients de Nash-Sutcliffe obtenus lors du calage et de la validation du débit étaient respectivement de 0,79 et 0,75 pour le bassin de la rivière Beaurivage. Les valeurs obtenues pour le bassin de la rivière Bras d'Henri étaient plus basses, le CNS s'établissant à 0,39 et 0,44, respectivement, pour le calage et la validation.

Les chercheurs ont eu recours à la normalisation logarithmique pour effectuer une comparaison graphique des résultats. Les tendances des valeurs simulées des sédiments, des nutriments, des pesticides et des pathogènes concordaient avec les valeurs mesurées, malgré des écarts d'ampleur et de synchronisation considérables entre les valeurs obtenues par la modélisation et par l'observation. Les résultats ont été jugés adéquats aux fins de l'évaluation des PGB.

Pratiques de gestion bénéfiques - Les chercheurs ont modélisé cinq PGB :

1) l'implantation de bandes riveraines de largeur variable (1, 3 et 5 mètres);
2) la réduction de 30 % du taux d'application de pesticides (atrazine);
3) l'usage de rampes à pendillards pour l'épandage du lisier;
4) la conversion des superficies de céréales et de maïs en pâturages et cultures de foin;
5) le recours au semis direct (sans travail du sol) dans les champs de maïs.

Le tableau 4 présente la réduction des charges exportées à l'exutoire des bassins des rivières Bras d'Henri et Beaurivage. On a évalué les PGB en modifiant les descripteurs correspondants dans le système de modélisation GIBSI. Par exemple, on a reproduit l'effet de la conversion de pâturages en foin en remplaçant l'occupation du sol « pâturage » des UHRH par « fourrage » et en éliminant le paramètre « bétail ».

Comme on l'a déjà vu, la valeur absolue des réductions dépend de la précision du calage du modèle. Néanmoins, les résultats sont conformes à ceux d'autres études. L'ajout de bandes riveraines et la conversion des pâturages en foin se sont révélées les PGB les plus efficaces pour réduire les charges en sédiments, en phosphore, en azote et en pesticides à l'exutoire du bassin de la rivière Bras d'Henri et les charges en sédiments, en phosphore, en azote et en pesticides à l'exutoire du bassin de la rivière Beaurivage. Faute de données suffisantes, il n'a pas été possible d'établir des tendances de la réduction, du sous-bassin versant (rivière Bras d'Henri) au bassin le plus vaste (rivière Beaurivage).



Tableau 4 : Résultats de l'évaluation des PGB dans les bassins versants des rivières Bras d'Henri et Beaurivage

Pratique de gestion bénéfique (PGB)	Réduction de la charge à l'exutoire du bassin de la rivière Bras d'Henri (%)				Réduction de la charge à l'exutoire du bassin de la rivière Beaurivage (%)			
	Sédiments	P Total	N Total	Atrazine	Sédiments	P Total	N Total	Atrazine
Bandes riveraines 1 m	10	29	58	40	10	29	56	42
Bandes riveraines 3 m	16	41	68	53	13	41	67	56
Bandes riveraines 5 m	19	49	72	62	15	49	71	64
Réduction de 30 % de l'atrazine				37				39
Épandage du lisier avec pendillards			(+1)				1	
Conversion des cultures de maïs et de céréales en pâturages et en foin	26	72	47	100	16	60	30	100
Semis direct sur le maïs	8	18	0	1	0	9	0	1

<u>**Modélisation économique intégrée**</u> - Les données produites par le modèle environnemental du bassin des rivières Bras d'Henri et Beaurivage ont été fournies aux groupes de modélisation économique des universités Laval et McGill. Jusqu'ici, l'absence d'une échelle physique commune constitue le principal obstacle à l'échange des données entre les modèles économiques et environnementaux. L'unité géographique de base des modèles socioéconomiques est la ferme, tandis que l'unité de base du modèle hydrologique est l'UHRH, laquelle, pour les besoins de la présente étude, a été réduite à la dimension approximative des fermes qui se trouvent dans le bassin versant. On dispose ainsi d'une unité commune qui se prête bien au transfert des données.

Rivière Lower Little Bow

<u>**Calage du modèle**</u> - On a effectué le calage d'un modèle SWAT afin de simuler le débit sortant du bassin versant pour la période 2004-2005 en fonction de trois scénarios, le premier sans irrigation et les deux autres avec irrigation. Le calage des trois scénarios a produit des résultats très semblables. Le coefficient de Nash-Sutcliffe (CNS) se situait entre 0,67 et 0,72 et la valeur de R^2, entre 0,70 et 0,73.

<u>**Incorporation de l'irrigation au modèle**</u> - L'irrigation peut exercer une influence majeure sur le bilan hydrologique, particulièrement durant les années sèches. Environ la moitié du bassin versant est irriguée. L'eau d'irrigation provient de deux sources : le district d'irrigation du nord de Lethbridge (DINL), situé à l'extérieur du bassin de la rivière Little Bow, et la rivière Little Bow elle-même.

Les calages initiaux ont été effectués pour les trois scénarios à partir des données de 2004 et 2005. Le premier scénario d'irrigation supposait un approvisionnement illimité en eau d'irrigation provenant du DINL. Dans le deuxième scénario, l'eau du cours d'eau principal (la rivière Little Bow) était prélevée selon un calendrier théorique d'irrigation à dates fixes prévoyant un approvisionnement bimensuel en eau du 15 avril au 15 août.

Malgré une bonne correspondance entre les débits sortants simulés et les valeurs dérivées des débits mesurés, aucun des scénarios n'était pleinement représentatif des conditions physiques réelles du bassin versant. Le bassin est irrigué à 47 %, ce qui invalide le scénario sans irrigation. De même, les deux scénarios d'irrigation, où l'eau provient dans chaque cas d'une seule source, ne reflètent pas la réalité de l'irrigation dans ce bassin versant. Les irrigateurs tirent l'eau de deux sources, selon l'emplacement de leur exploitation. Dans la partie



sud du bassin, l'eau d'irrigation provient du DINL; dans la partie nord, les producteurs tirent leur eau de la rivière Little Bow. Le calage sera refait au cours de l'EPBH II, à l'aide de données additionnelles sur les sources de l'eau d'irrigation, ainsi que de nouvelles données sur le moment de l'irrigation.

L'analyse de sensibilité menée sur les paramètres hydrologiques n'indique pas beaucoup de variabilité dans les paramètres retenus pour chacun des trois scénarios. Pour cette raison, on s'attend à ce que la reprise du calage à l'aide des nouvelles données sur l'irrigation (quantité et moment) soit un succès.

Validation - Au cours de la prochaine phase, le modèle sera validé au moyen des données de 2006, année au cours de laquelle les précipitations ont été inférieures à la moyenne. On s'attend à ce que l'irrigation soit le principal moteur du cycle hydrologique. Avec des données plus précises sur les pratiques d'irrigation, le modèle devrait produire des résultats utiles.

Pratiques de gestion bénéfiques - Les PGB du bassin versant n'ont pas fait l'objet de recherches dans le cadre de l'étude en cours; cependant, l'étude de deux PGB, soit la gestion du lisier et la conversion de cultures céréalières annuelles en couverture végétale (luzerne, graminées), est prévue pour l'EPBH II. De même, les résultats de cette étude laissent supposer que la gestion de l'irrigation visant à réduire la lixiviation de nutriments (nitrate) dans l'eau souterraine pourrait être analysée à titre de PGB.

Rivière Salmon

Calage et évaluation du modèle - Extrait du rapport : [traduction]« Le modèle SWAT a fait l'objet d'un calage et d'une validation à l'aide des données spatiales sur le débit du cours d'eau et l'exportation de nutriments recueillies à cinq sites répartis sur la longueur du bassin versant, de ses eaux d'amont à McInnis jusqu'à son exutoire au pont de la route 1; on a utilisé temporairement des données mensuelles de 1996 à 2006 » (Zhu, Broersma, Meays et Mazumder, 2008). Les données ont été divisées en deux périodes aux fins du calage (1996-2000) et de la validation (2001-2006).

Conformément au mode opératoire normalisé du modèle SWAT, on a d'abord procédé au calage du débit, puis à celui des sédiments et des nutriments. L'étude conclut que les débits mensuels et les exportations de nutriments simulés par le modèle SWAT correspondent bien aux données observées sur le terrain. Le coefficient de Nash-Sutcliffe a servi à évaluer les résultats du modèle. Le CNS des calages du débit variait de 0,67, à l'exutoire situé près du bras Salmon, à 0,46, plus en amont à Falkland. Le modèle ne prenait pas en compte les prélèvements pour l'irrigation, qui pourraient avoir influé sur certaines observations du débit en été.

Malgré l'absence de données à ce chapitre, on a estimé les sédiments dans le modèle SWAT à l'aide des valeurs théoriques (par défaut) des paramètres des sédiments, en escomptant que la relation étroite entre le débit et le transport des sédiments permettrait de produire des résultats raisonnables. Pour citer de nouveau le rapport : [traduction] « Les sédiments dépendent du taux de ruissellement, de sorte qu'une fois qu'on a simulé correctement le ratio entre le ruissellement et le débit de base, la charge en sédiments devrait se rapprocher des valeurs mesurées » (Zhu, Broersma, Meays et Mazumder, 2008).

Le calage des exportations de nutriments dans le cours d'eau s'est fait en vérifiant d'abord les concentrations initiales de nutriments dans les sols, la quantité d'engrais épandus et le travail du sol, puis en rajustant les paramètres qui déterminent le taux de lixiviation des nutriments. On a défini l'impact de l'occupation actuelle du sol sur l'exportation de nutriments comme la différence entre la concentration actuelle de nutriments et celle qu'on aurait observée à l'état naturel. On a déterminé les estimations des exportations de nutriments dans les conditions actuelles et à l'état naturel en exécutant le modèle pour l'occupation actuelle du sol, puis pour un bassin versant boisé, qu'on a supposé être l'état naturel des lieux. L'exportation totale estimative du bassin versant vers l'eau de surface est présentée au tableau 5.

Validation - Le modèle a été validé à l'aide des paramètres du modèle calé et des données météorologiques, de gestion et d'occupation du sol pour les années 2001 à 2006. Les débits simulés et mesurés correspondaient assez bien, les valeurs du CNS étant respectivement de 0,71 et 0,58 au pont de la route 1 et à Falkland.

La qualité de l'eau modélisée (N, P) concordait plutôt bien avec les valeurs mesurées. Par exemple, les valeurs du CNS pour l'azote (NO_3-N) variaient de 0,40 à la route 1 à 0,62 à McInnes, la station de prélèvement la plus en amont. Le CNS applicable au phosphore résiduel soluble variait de 0,23 près de l'exutoire (route 1) à 0,51 plus en amont, à Glenemma. De même, le CNS du phosphore organique dissous variait de 0,52 à 0,42.



Impact de l'occupation actuelle du sol - On a estimé que l'impact de l'occupation actuelle du sol correspondait à la différence entre la charge associée à *l'occupation* du sol en 1993 et un scénario de référence où on posait l'hypothèse que toutes les terres étaient occupées par une forêt naturelle. Les exportations de nutriments du bassin versant dans les conditions actuelles et à l'état naturel sont illustrées au tableau 5.

Modèle bactérien du bassin versant - Les chercheurs ont démarré et mis au point un modèle bactérien du bassin versant afin de simuler le transfert de coliformes fécaux et de bactéries *E. coli* de leurs sources au cours d'eau, compte tenu des processus hydrologiques, des effets du climat et des pratiques de gestion du bassin versant. Un module hydrologique a été intégré au modèle bactérien du bassin. Une inspection visuelle des débits simulés et observés de la rivière Salmon près de Falkland laisse supposer que le module hydrologique permettrait de simuler assez bien les débits journaliers. Ce module n'a pas servi à modéliser les PGB.

Pratiques de gestion bénéfiques - On a estimé l'impact de l'occupation actuelle du sol en comparant les charges en nutriments de 1993 aux charges d'un scénario de référence où le bassin versant est couvert d'une forêt. Les résultats sont présentés au tableau 5.

On a établi un processus d'élaboration des PGB propre à maximiser le rendement économique de la mise en œuvre d'une PGB tout en gardant le niveau des exportations de nutriments vers l'eau de surface en deçà des recommandations pour la qualité de l'eau. Cette méthode suppose que les avantages économiques augmenteront avec l'application de la PGB et que l'application maximale sera fonction de la charge maximale acceptable pour la qualité de l'eau.

Les exemples utilisés étaient l'épandage de fumier dans les pâturages et l'épandage d'engrais azoté (NH_4-NO_3) sur le fourrage, en quantités qui garderaient la concentration de nitrate dans l'eau en deçà de la recommandation pour la qualité de l'eau en Colombie-Britannique, qui est de 10 mg/L. On a dérivé une formule pour le calcul de la charge applicable à la PGB, laquelle a été définie comme étant la différence entre la charge maximale admissible et la somme des charges actuelles. Ce calcul a permis d'estimer que la concentration maximale de l'épandage d'engrais à base de NO_3-N est de 210 kg ha^{-1} an^{-1}, en supposant qu'il n'y ait pas d'épandage de fumier. De même, la quantité maximale de fumier d'épandage est de 40 t ha^{-1} an^{-1}.

Analyse de sensibilité - À l'aide du modèle validé, les chercheurs ont entrepris une analyse de sensibilité afin de déterminer les impacts potentiels sur la qualité de l'eau de surface associés à l'épandage d'engrais à base de NH_4NO_3 sur des sols produisant du fourrage au début de mai, suivi de l'épandage de fumier sur les pâturages pendant la saison de broutage. Les taux d'épandage étaient de 50, 100 et 150 kg ha^{-1} an^{-1} pour chaque PGB.

Les exportations de nitrate ont connu une augmentation significative de 4,6 kg ha^{-1} an^{-1} par tranche de 100 kg d'engrais à base de NH_4NO_3 épandu ($P < 0,01$; $R^2 = 0,84$). L'épandage de fumier n'a pas accru significativement les exportations de nutriments.

Tableau 5 : Estimation des exportations de nutriments (tonnes/an) en provenance du bassin versant de la rivière Salmon

	Description de l'occupation du sol	NO_3	Azote organique dissous	Phosphore résiduel soluble	Phosphore organique dissous
Base Case Scénario de référence	Couvert forestier naturel	11	16	2	3
Occupation actuelle du sol[1]	Occupation du sol en 1993	16	23	6	10

[1] Les exportations totales correspondent à la somme des augmentations documentées dans le rapport et des valeurs du scénario de référence.



Ruisseau Tobacco Sud

Le bassin hydrographique du ruisseau Tobacco Sud est l'objet d'études scientifiques depuis plus de 15 ans. Ces études ont produit un riche ensemble de données agronomiques et environnementales de référence qui peuvent servir d'intrants au modèle SWAT pour simuler le débit et les processus liés aux sédiments et aux nutriments dans le bassin versant. On dispose également de données sur de petits sous-bassins, tel le bassin versant du ruisseau Steppler d'une superficie de 210 ha, dont la désignation de site expérimental de l'EPBH en 2004 a débouché sur l'installation de neuf stations de surveillance.

Calage et validation du modèle - Les efforts de calage se sont concentrés sur l'amélioration des prévisions produites par le modèle à deux stations de surveillance du ruisseau Tobacco Sud, à Miami et à la route 240. La période de calage était de 1991 à 1998 à Miami et de 1993 à 1998 à la route 240. Le calage comprenait une période de démarrage de 1986 à 1990 pour la station de Miami et de 1993 à 1995 pour celle de la route 240, afin de réduire au minimum les effets de conditions initiales incertaines. Cet exercice n'a pas été fait dans les autres bassins de l'EPBH.

Le modèle SWAT a simulé avec succès l'écoulement ainsi que les charges de sédiments et de nutriments à l'exutoire du bassin versant. On a réalisé une analyse de sensibilité afin de déterminer les paramètres de modélisation clés. Les valeurs finales des paramètres d'entrée sensibles ont été déterminées à l'aide d'une méthode d'autocalage.

Les résultats des simulations du débit présentent une bonne concordance entre les débits simulés et mesurés pour les pas de temps journaliers, mensuels et annuels du calage et de la validation. Les valeurs respectives du CNS aux stations de la route 240 et de Miami étaient de 0,61 et 0,64 pour les débits journaliers du ruisseau Tobacco Sud, de 0,74 et 0,76 pour ses débits mensuels et de 0,81 et 0,83 pour ses débits annuels. Les résultats obtenus dans les sous-bassins versants ne sont pas aussi satisfaisants, à l'exception, peut-être, des bassins des ruisseaux Twin Est et Ouest, où le CNS s'établissait respectivement à 0,51 et 0,47.

Les calages relatifs à la qualité de l'eau, soit les charges en sédiments, en azote et en phosphore, visaient à faire concorder des simulations ponctuelles plutôt que des prévisions journalières et mensuelles continues, et ce, en raison de la fréquence de prélèvement d'échantillons instantanés. On trouvera une description détaillée de la configuration des paramètres relatifs à l'eau de fonte, au débit et à la production de sédiments et de nutriments dans le rapport du projet.

Sédiments - Étant donné la faible pente du chenal et la granulométrie fine des matériaux du lit du bassin à l'étude, le transport des sédiments charriés sur le fond peut être considéré comme négligeable comparativement à la charge totale en sédiments à l'exutoire du bassin. Par conséquent, la charge en sédiments simulée par le modèle est directement comparable aux matières en suspension (MES) mesurées.

La simulation de la charge en sédiments à la station de Miami présente un coefficient de corrélation élevé (0,85), mais ce coefficient est nettement plus faible pour les ruisseaux Twin Ouest (0,42) et Est (0,38), en raison des prévisions relativement médiocres du débit et des concentrations de sédiments à ces deux stations.

Évaluation - Pour ce qui est des débits, la performance du modèle a fait l'objet d'une évaluation qualitative réalisée à l'aide de courbes de séries temporelles, ainsi que d'une évaluation quantitative réalisée au moyen de deux statistiques relatives à la performance du modèle : le biais[1] et le coefficient de Nash-Sutcliffe (CNS). On a évalué les valeurs simulées du débit mensuel en les comparant aux valeurs enregistrées, à l'aide du coefficient de corrélation, de l'erreur quadratique moyenne (EQM) et du coefficient de variation de l'EQM.

Évaluation des PGB - Les six PGB prises en considération dans cette étude avaient toutes été mises en œuvre à divers degrés dans le bassin versant du ruisseau Tobacco Sud. Ces PGB sont les petits barrages, les bassins de retenue, la gestion des pâturages, le travail de conservation du sol, la conversion en cultures fourragères et la restauration des milieux humides. Dans plusieurs cas, un prétraitement s'est avéré nécessaire. Les PGB examinées dans le bassin versant du ruisseau Steppler sont un petit barrage, des bassins de retenue, la gestion des pâturages riverains, le semis direct et la conversion en cultures fourragères.

Petits barrages - Le bassin versant du ruisseau Tobacco Sud comporte 27 petits barrages construits entre 1985 et 1992 afin d'atténuer les crues dans les tronçons d'aval. Ces petits barrages

[1]Le biais d'un modèle s'exprime comme la différence moyenne relative entre les débits simulés et observés dans un échantillon de simulation assez considérable; il reflète la capacité du modèle à reproduire l'équilibre hydrique (Rapport sur le ruisseau Tobacco Sud).



réduisent aussi les charges en sédiments et en nutriments. Un travail considérable a été effectué pour élaborer des courbes de profondeur, de superficie, de volume et de rejet pour les petits barrages.

Bassins de retenue - Le modèle SWAT a servi à simuler les effets sur la qualité de l'eau de tous les bassins de retenue proposés à l'échelle des producteurs et à l'exutoire du bassin du ruisseau Tobacco Sud, à l'aide des données sur le bassin du ruisseau Steppler (2004-2006). Les bassins de retenue emmagasinent les déchets des enclos à bestiaux, ce qui empêche les nutriments de pénétrer dans le ruisseau. Vu la petite dimension des secteurs d'apport que représentent les enclos à bestiaux, on peut représenter l'effluent des enclos par des sources ponctuelles simulées à l'aide de la routine de source ponctuelle du modèle SWAT. Les contaminants sont retenus dans le bassin de retenue et l'excès d'eau est pompé vers les terres agricoles voisines aux fins de l'irrigation et traité comme un épandage de fumier. En l'absence de bassins de retenue, les déchets sont rejetés dans le cours d'eau avec le ruissellement, surtout à la fonte des neiges.

L'emplacement de tous les intrants ponctuels a été répertorié dans le modèle SWAT à l'aide d'une table des positions de sources ponctuelles. Le secteur d'apport a été soustrait des fichiers d'entrée du sous-bassin dans le modèle SWAT afin d'éviter tout comptage double.

Gestion des pâturages - Les pratiques de gestion des pâturages simulées dans le cadre de cette étude sont le pâturage en rotation, l'abreuvement loin des cours d'eau et les clôtures d'exclusion. La période de broutage s'étend généralement de la mi-mai à la fin septembre. Le modèle SWAT n'est pas doté de fonctions de gestion des pâturages à l'échelle des URH; ainsi, par exemple, on ne peut appliquer le pâturage en rotation à une seule URH. Pour résoudre ce problème, on a simulé le pâturage en rotation à l'échelle des sous-bassins, puis effectué par la suite la conversion au niveau des URH.

Travail de conservation du sol - On peut simuler diverses techniques de travail du sol dans le modèle SWAT en sélectionnant la technique voulue à l'entrée du modèle. Le travail de conservation du sol dans le bassin versant comprend le passage unique des disques, le sous-solage, le billonnage et le semis direct.

Conversion en cultures fourragères - La conversion en cultures fourragères consiste à remplacer les cultures annuelles par des cultures fourragères pérennes, qui se caractérisent par un apport réduit en engrais et un travail du sol moins intensif. Cette pratique peut être simulée dans le modèle SWAT.

Restauration des milieux humides - Les milieux humides existants ont déjà été pris en compte dans la sélection des URH. Les milieux humides qu'il est possible de restaurer ont été répertoriés à l'aide des données du modèle altimétrique numérique (MAN) levé au lidar, qui permettent de reconnaître les dépressions du paysage qui pourraient avoir déjà été des milieux humides. Les scénarios de restauration des milieux humides ont été élaborés tel qu'indiqué au tableau 6.

Modélisation environnementale-économique intégrée - On a développé une interface logicielle qui facilite l'échange d'information entre le modèle hydrologique et les modèles économiques (de l'économie à la ferme et du comportement des exploitations agricoles) élaborés pour le bassin versant du ruisseau Tobacco Sud à l'aide d'une routine sur ArcGIS qui a été mise au point pour convertir les données hydrologiques à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique (URH) dans les échelles de la terre et de la ferme, en usage dans les modèles socioéconomiques. À l'inverse, la routine pourra aussi redimensionner les données utilisées ou produites par les modèles économiques à l'échelle de l'URH, qu'utilise le modèle hydrologique. Comme les modèles ont été développés séparément, la base de données de chacun d'eux reste intacte et indépendante des autres.

Cette interface peut servir à élaborer et mettre à l'essai des scénarios de PGB, tels ceux qui sont répertoriés dans le Modèle du comportement des exploitations agricoles, par exemple, en entrant les données requises pour modifier les pratiques de gestion dans chacune des parcelles de terre touchées. L'interface convertira l'information de manière à permettre l'évaluation des avantages du scénario au moyen du modèle hydrologique.

L'interface n'est pas encore achevée; il reste à élaborer les modules de l'économie à la ferme et du comportement des exploitations agricoles. Si le développement de l'interface se déroule comme prévu, les chercheurs et les gestionnaires de la conservation auront à leur disposition un outil précieux et même convivial, doté d'écrans d'entrée graphiques et de menus déroulants.



Tableau 6 : Impacts des PGB dans le bassin versant du ruisseau Tobacco Sud

PGB	Scénario	Taux de réduction résultant de l'application de la PGB[a]			
		Débit	Sédiments	N Total	P Total
Petits barrages	De 5 à 15 m^3/s	5.7	5.3	4.4	4.8
	De 1 à 5 m^3/s	2.1			
	De 0,5 à 1 m^3/s	0.5			
	<0,5 m^3/s	0.0			
Bassins de retenue	12 bassins	0.048	0.076	0.172	0.156
Gestion des pâturages		0.025	0.968	0.741	0.971
Travail de conservation du sol	Conversion du travail de conservation du sol en travail du sol classique	1.82	(3.03)	(2.80)	(2.29)
	Conversion du travail du sol classique en travail de conservation du sol	(13.8)	9.5	9.2	11.1
Conversion en cultures fourragères	Conversion des cultures en fourrage	3.5	5.54	28.0	30.0
	Conversion du fourrage en blé d'hiver	(0.4)	(0.76)	(3.92)	(4.14)
Restauration des milieux humides	Toutes les zones de stockage de l'eau dans les dépressions	16.08	20.42	16.97	16.36
	1/2	8.49	11.42	9.27	9.05
	1/4	4.28	5.72	5.43	5.34
	1/8	2.69	4.40	4.28	4.14

Note [a] : Les valeurs entre parenthèses représentent une augmentation.

Ruisseau Thomas

Calage et validation du modèle - Le calage du modèle permet de simuler les débits journaliers, l'érosion et le transport des sédiments, de même que la qualité de l'eau à l'exutoire du bassin versant. Une analyse de sensibilité a permis aux chercheurs de déterminer les paramètres les plus sensibles. Le débit journalier a été modélisé pour la période d'avril 2005 à février 2006 (R^2 = 0,46). L'extrant du modèle en ce qui concerne les sédiments et la qualité de l'eau a été illustré graphiquement, mais il n'a pas fait l'objet d'une évaluation statistique. L'absence de données sur les précipitations et la température sur place, d'information sur le drainage par tuyaux enterrés et de données précises sur l'épandage d'engrais est considérée comme une série de lacunes auxquelles il faudra remédier pour améliorer les résultats du modèle.

L'étude conclut que le modèle est apte à représenter la réponse hydrologique du bassin versant. Les principaux paramètres visés par le calage sont ceux qui concernent les eaux souterraines; ces paramètres ont une incidence sur l'ampleur et le moment de la décrue du débit de base.

Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques - Six PGB ont fait l'objet d'une évaluation et d'une comparaison avec un scénario de référence sur une période de cinq ans. Ces PGB visent principalement à atténuer l'érosion du sol et à réduire l'exportation de nutriments dans le ruissellement. Ce sont : 1) l'élimination du broutage des vaches; 2) l'ajout d'une bande riveraine filtrante de 10 m aux URH adjacentes au cours d'eau; 3) l'élimination des pratiques de travail du sol des URH où le maïs est la culture dominante; 4) le remplacement des engrais inorganiques par du fumier; 5) la culture en bandes alternantes de l'orge et du maïs; 6) la réduction des matières organiques.



On a fait des recherches sur toutes ces PGB en rajustant les paramètres du modèle SWAT. Les PGB avaient un impact négligeable sur le débit. Le transport des sédiments a été réduit par l'ajout de bandes filtrantes, mais les autres PGB l'ont laissé relativement inchangé.

L'impact sur la qualité de l'eau est variable. L'étude sur le ruisseau Thomas est la seule à avoir considéré les exportations d'azote et de phosphore sous des formes autres que l'azote total et le phosphore total. Le tableau 7 présente l'impact relatif des PGB sur tous les paramètres de qualité de l'eau analysés : les matières en suspension (MES), le phosphore minéral, le phosphore organique, le phosphore total, l'azote organique, l'ammonium, l'azote Kjeldahl total, les nitrates et l'azote total. Le tableau 8 présente le taux de variation des concentrations de phosphore total et d'azote total associé à chaque PGB.

Tableau 7 : Impacts prévus de PGB choisies sur la qualité de l'eau dans le bassin versant du ruisseau Thomas

PGB	MES	P minéral	P organique	P total	organique N	Ammonium	Azote Kjeldahl total	Nitrate	N total
1. Pas de pâturage	0	0	0	0	0	+1	0	0	+1
2. Bande filtrante (10 m)	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
3. Semis direct du maïs	0	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0	+1
4. Fumier	0	0	0	0	0	+1	0	-1	0
5. Culture en bande	0	0	-1	-1	-1	0	-1	0	-1
6. Réduction de la quantité de matières organiques	0	0	0	-1	0	0	0	0	0

Légende :
+1 : augmentation de la charge; –1 : diminution de la charge; 0 : variation nulle ou négligeable de la charge.

Tableau 8 : Réduction des charges en sédiments, en azote total et en phosphore total dans le bassin versant du ruisseau Thomas par les PGB

PGB	Taux de réduction de la charge (%)		
	Sédiments	P total	N total
1. Pas de pâturage	0.0	(0.2)	(1.7)
2. Bande filtrante (10 m)	6.0	8.2	8.7
3. Semis direct du maïs	0.6	(9.2)	(9.2)
4. Fumier	0.0	(0.4)	(0.7)
5. Culture en bande	0.6	3.6	(1.7)
6. Réduction de la quantité de matières organiques	0.6	0.6	(-0.2)

Note: Les valeurs entre parenthèses représentent un accroissement de la charge.



Résultats globaux

Le modèle SWAT a servi à modéliser tous les bassins versants, à l'exception du bassin des rivières Bras d'Henri et Beaurivage, modélisés à l'aide du système GIBSI. Les deux systèmes ont cependant utilisé la même séquence de modélisation (figure 3), décrite dans *SWAT User's Manual 2000*. Les modèles calés et les modèles de soutien élaborés au cours de l'étude ont servi à évaluer les effets de certaines PGB choisies sur le ruissellement, la sédimentation et la qualité de l'eau.

La présente section donne un aperçu des exercices de modélisation réalisés, afin d'illustrer les progrès accomplis dans le développement des modèles et d'évaluer la qualité de la modélisation. On prévoit un jour utiliser les modèles calés pour simuler l'hydrologie et la qualité de l'eau des bassins versants en fonction d'autres périodes de relevé et de l'évolution des pratiques d'aménagement du territoire et d'occupation du sol pour évaluer la performance des PGB dans les bassins versants dans des conditions de variabilité climatique et, éventuellement, pour modéliser des bassins versants non jaugés[1]. Les renseignements sur l'efficacité des PGB telle que déterminée par la modélisation s'accompagnent d'une description sommaire des PGB. Dans cette section, on trouvera par ailleurs un résumé des travaux visant à intégrer le modèle hydrologique et les modèles économiques. Les chercheurs ont élaboré un cadre pour mesurer les progrès réalisés dans le calage et le développement des modèles, ainsi que dans l'évaluation des PGB. Une méthode proposée pour évaluer la qualité des données de sortie des modèles offre une base de référence scientifique pour comparer les résultats obtenus pour divers bassins versants. Dans la section 5, on verra différentes solutions possibles pour clarifier les buts à long terme du projet d'EPBH.

Progrès réalisés

Comme nous l'avons vu à la section 2, l'EPBH I avait pour but de caler un modèle de bassin versant, de vérifier l'efficacité du modèle à évaluer les PGB et d'élaborer des méthodes d'intégration du modèle hydrologique et des modèles économiques. Les participants à l'EPBH I ont fait de grands progrès dans l'évaluation des PGB en calant des modèles pour prévoir les exportations d'eau, de sédiments et de nutriments à partir des bassins versants; dans deux bassins, les études qu'ils ont réalisées sur la possibilité d'intégrer les modèles environnementaux et économiques ont donné des résultats encourageants. Le tableau 9, ci-dessous, résume les parties de l'étude qui sont terminées.

Pour résumer, on a appliqué le modèle SWAT à cinq bassins versants : le ruisseau Black, la rivière Lower Little Bow, la rivière Salmon, le ruisseau Tobacco Sud et le ruisseau Thomas. Le bassin versant des rivières Bras d'Henri et Beaurivage a été modélisé à l'aide du modèle GIBSI. Les modèles hydrologiques sont calés pour les six bassins versants, mais certains ont encore besoin de quelques ajustements. Dans trois bassins versants, on a calé les modèles de façon à prévoir les trois éléments, soit l'hydrologie, les exportations de sédiments et les exportations de nutriments.

Par ailleurs, diverses PGB actuellement en vigueur ou envisagées ont fait l'objet d'évaluations à l'aide du modèle calé pour chaque bassin versant, à l'exception de celui de la rivière Lower Little Bow, où l'évaluation des PGB débutera au cours de l'EPBH II.

D'autres travaux d'évaluation des PGB ont eu lieu dans les bassins versants du ruisseau Tobacco Sud et du ruisseau Black. Dans le bassin versant du ruisseau Black, on a élaboré des modèles pour examiner l'impact des voies d'eau gazonnées et des terrasses de déviation. Dans le cas du bassin du ruisseau Tobacco Sud, on a intégré les modèles REMM et SWAT afin de modéliser l'impact des bandes riveraines. On a en outre consacré beaucoup de temps à élaborer des routines et à obtenir des données utilisables pour modéliser les effets des petits barrages et des bassins de retenue de déchets d'élevage intensif. Pour modéliser les PGB dans les bassins versants des rivières Bras d'Henri et Beaurivage, d'une part, et du ruisseau Thomas et de la rivière Salmon, d'autre part, on a eu recours à la capacité existante des modèles GIBSI et SWAT. Un modèle bactérien, partiellement élaboré pour la rivière Salmon, n'a cependant pas servi à évaluer les PGB.

[1] Pour ce faire, il faudrait connaître les caractéristiques physiques particulières du bassin versant non jaugé, par exemple les précipitations, et disposer d'un modèle altimétrique numérique, de données pédologiques et de données d'occupation du sol. On pourrait modéliser le bassin versant en appliquant les paramètres du modèle SWAT du bassin versant calé à un modèle SWAT renfermant les caractéristiques physiques connues.



Tableau 9 : Sommaire des parties terminées de l'étude[1]

	Calage/validation du modèle			Évaluation des PGB	Intégration
	Hydrologie	Hydrologie	Hydrologie		
Ruisseau Black	Oui	Oui	En partie	Oui	Non
Rivières Bras d'Henri et Beaurivage	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Rivière Lower Little Bow	En partie	Non	Non	Non	Non
Rivière Salmon	Oui	Non	En partie	Oui	Non
Ruisseau Tobacco Sud	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Ruisseau Thomas	Calage journalier	Non	Oui	Oui	Non

Qualité des modèles et methods d'évaluation

Pour évaluer la qualité des modèles, on trouve des lignes directrices utiles dans *SWAT User's Manual 2002* et les critères d'évaluation récemment élaborés par une équipe sous la direction du Service de recherche agricole (Agricultural Research Service) du département de l'Agriculture des États-Unis. Le guide d'utilisation du modèle SWAT, qui comprend une liste de vérification pour la mise à l'essai de modèles, recommande des mesures statistiques à employer pour caler et valider des modèles (figure 5). Quelques-unes de ces recommandations faisaient partie du processus de modélisation de l'EPBH I, par exemple l'emploi de graphiques chronologiques et de courbes des débits classés. Parmi les bassins versants, seul celui des rivières Bras d'Henri et Beaurivage a fait l'objet de calages saisonniers (étiage estival).

Plus récemment, une équipe de chercheurs dirigée par le Service de recherche agricole du département de l'Agriculture des États-Unis a publié des directives pour l'évaluation des résultats du calage et de la validation des modèles. On y recommande notamment de reporter les données mesurées et prévues sur des hydrogrammes et des courbes des débits classés afin de les comparer pour obtenir une première appréciation de la qualité des résultats de la modélisation. Ce type de graphique donne une bonne idée visuelle de la validité de l'ajustement et permet de détecter les erreurs ou les biais évidents du modèle.

On recommande trois paramètres statistiques pour évaluer la qualité du travail de modélisation : le coefficient de Nash-Sutcliffe (CNS), le pourcentage de biais (PBIAS) et une statistique relativement nouvelle, le RSR, définie comme le rapport entre l'erreur quadratique moyenne et l'écart-type de l'échantillon observé. Le tableau 10 indique les cotes de performance suggérées.

Liste de vérification pour la mise à l'essai de modèles

1. Bilan hydrique – tous les éléments sont-ils comptabilisés?
2. Série chronologique
3. Total annuel – écoulement et débit de base
4. Total mensuel et saisonnier
5. Courbe fréquence-durée
6. Bilan sédimentaire et nutritif

Statistiques de calage et de validation

1. Moyenne et écart-type des données simulées et mesurées
2. Pente, point d'intersection et coefficient de régression/coefficient de détermination (R^2)
3. Coefficient de Nash-Sutcliffe

Figure 5 : Liste de vérification pour la mise à l'essai des modèles[1]

[1] Renseignements tirés de *SWAT User's Manual Version 2000*.



Tableau 10 : Cotes de performance suggérées pour les statisiques d'evaluation des modéles[1]

Cote de performance	RSR	CNS	PBIAS (%)		
			Écoulement	Sédiments	N, P
Très bon	0.00 ≤ RSR ≤0.50	0.75 < NSE ≤ 1.0	PBIAS < ± 10	PBIAS < ± 15	PBIAS < ± 25
Bon	0.50 < RSR ≤ 0.60	0.65 < NSE ≤ 0.75	± 10 ≤ PBIAS < ± 15	± 15 ≤ PBIAS < ± 30	± 25 ≤ PBIAS < ± 40
Acceptable	0.60 < RSR ≤ 0.70	0.50 < NSE ≤ 0.65	± 15 ≤ PBIAS < ± 25	± 30 ≤ PBIAS < ± 55	± 40 ≤ PBIAS < ± 70
Insuffisant	RSR > 0.70	NSE ≤ 0.50	PBIAS > ± 25	PBIAS > ± 55	PBIAS > ± 70

L'étude reconnaît qu'on utilise beaucoup le coefficient de corrélation (r) et le coefficient de détermination (R^2), auxquels le *SWAT User's Manual Version 2002* fait référence, pour mesurer la qualité des données de sortie des modèles. Pourtant, les méthodes d'évaluation recommandées n'ont aucunement recours à R^2. Le rapport donne comme raison la trop grande sensibilité de R^2 aux valeurs extrêmes supérieures et son manque de sensibilité aux différences additives ou proportionnelles entre les données simulées et mesurées. Signalons que le CNS est aussi assez sensible aux valeurs extrêmes (P. Krause, D.P. Boyle et F. Bäse, 2005).

Ces recommandations se fondent sur un relevé des résultats d'études sur les bassins versants réalisées aux États-Unis entre 1996 et 2007. Malgré tout, il ne faut pas négliger la valeur de R^2; à titre de paramètre statistique bien reconnu et compris, ce coefficient doit garder sa place comme élément de mesure dans les études d'EPBH sur les bassins versants.

Évaluation de la qualité d'un modèle - On devrait faire référence aux critères mentionnés au tableau 10 à chaque étape du processus de calage et de validation (hydrologie, sédiments et qualité de l'eau), en faisant toutefois preuve de discernement. Les circonstances particulières qui entourent l'étude de chaque bassin versant et l'utilisation prévue des données de sortie du modèle peuvent déterminer en partie ce qu'on entend par un résultat acceptable. D'après l'étude, les normes les plus strictes s'imposent là où les enjeux sont majeurs, comme dans le cas d'une déposition devant le Congrès, de l'élaboration de lois ou de règlements ou d'un litige. Des normes moins sévères peuvent s'appliquer, par exemple dans les cas d'évaluation technologique, si aucun litige ou règlement n'entre en jeu. Les normes peuvent être relâchées davantage quand il d'agit de recherche exploratoire.

Applications des critères d'évaluation à la modélisation - Dans le cadre de l'EPBH, les exercices de modélisation devraient servir au bout du compte à obtenir des données qui serviront à définir, concevoir et soutenir des mesures proposées aux gouvernements, aux gestionnaires de la conservation et aux propriétaires afin de les aider à choisir et à mettre en œuvre des PGB. Pour cela, la modélisation doit atteindre un bon niveau de précision. Les valeurs indiquées au tableau 10 pourraient s'avérer utiles pour mesurer la qualité des modèles.

Bien qu'une partie de la modélisation réalisée jusqu'ici dans le cadre de l'EPBH I affiche une performance jugée « très bonne » en ce qui a trait au CNS, des améliorations s'imposent dans la plupart des modèles, notamment pour élaborer des statistiques supplémentaires, comme le PBIAS, et pour examiner la performance saisonnière et à long terme du modèle. Dans l'ensemble, on peut qualifier la modélisation réalisée jusqu'ici d'évaluation technologique et, dans certains cas, d'évaluation exploratoire. Dans ce dernier cas, on peut envisager d'approfondir l'étude chaque fois qu'on a obtenu un CNS > 0, si on estime justifié de croire qu'on peut améliorer le résultat de la modélisation. L'ensemble des résultats doit toutefois faire l'objet d'une évaluation approfondie et, dans certains cas, d'une amélioration, avant qu'on puisse les considérer acceptables comme fondement pour la conception, pour les décisions de financement et d'évaluation ou pour le choix des PGB.

[1] Renseignements tirés de Moriasi, D.N., et coll. (2007). « Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations », *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, vol. 50, n° 3, p. 891, tableau 4.



Statistiques d'évaluation des modèles employées durant l'EPBH I

Les études sur les bassins versants ont fait appel à toute une gamme de statistiques de mesure, ce qui complique la comparaison des résultats. Il faudrait normaliser les critères d'évaluation afin de permettre les comparaisons d'un bassin versant à l'autre.

Les études de modélisation réalisées dans le cadre de l'EPBH faisaient appel à diverses méthodes d'évaluation ou critères d'efficacité, comme le montre le tableau 11. Les statistiques d'évaluation (CNS et R^2) employées pour le calage et la validation du débit sont résumées au tableau 12. Les chercheurs responsables de l'étude de modélisation hydrologique du ruisseau Tobacco Sud, par exemple, ont calculé le biais pour mesurer l'efficacité, en plus de recourir aux coefficients R^2 et CNS habituels. Dans un autre cas, les auteurs de l'étude sur le bassin des rivières Bras d'Henri et Beaurivage ont employé la transformation logarithmique pour améliorer l'aperçu visuel, mais ils ont aussi établi les courbes des débits classés, conformément à la liste de vérification du modèle SWAT.

Dans une étude de divers critères d'efficacité, dont le coefficient de détermination et le coefficient de Nash-Sutcliffe, Krause et coll. signalent que [traduction] « dans l'ensemble, on peut affirmer qu'aucun des critères d'efficacité décrits et mis à l'essai n'affiche une performance idéale. Chacun des critères possède ses propres avantages et inconvénients, dont il faut tenir compte au moment de caler et d'évaluer le modèle. Le coefficient de Nash-Sutcliffe et le coefficient de détermination, le plus souvent employés, s'avèrent très sensibles aux débits de pointe, au détriment de la performance dans des conditions d'étiage. »

Modélisation des pratiques de gestion bénéfiques

Au total, 17 PGB ont été soumises à des essais dans cinq bassins versants, à l'aide des modèles SWAT et GIBSI. Le tableau 12 indique les PGB mises à l'essai dans les différents bassins versants. Le tableau 13 montre les données et les méthodes utilisées pour évaluer les PGB dans chaque bassin versant.

Du point de vue environnemental, les PGB visent à réduire les effets néfastes de l'agriculture sur la qualité de l'eau des bassins versants. La plupart des PGB mises à l'essai ont eu pour effet de réduire la charge en sédiments et en nutriments. Étant donné la mise au point imparfaite de quelques modèles employés, les résultats ne représentent peut-être qu'une tendance. Les PGB devraient faire l'objet d'une nouvelle évaluation lorsque des modèles améliorés deviendront disponibles.

Tableau 11 : Méthodes employées dans le cadre de l'EPBH I pour évaluer les résultats de modélisation des bassins versants

Méthodes d'évaluation	Ruisseau Black	Rivières Bras d'Henri et Beaurivage	Rivière Lower Little Bow	Rivière Salmon	Ruisseau Tobacco Sud	Ruisseau Thomas
Graphiques chronologiques	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Bilan hydrique						
Volume annuel ou moyen		✓				
Erreur quadratique moyenne (EQM)					✓	
Pente/ordonnée à l'origine		✓ (graphiques)				
Écart-type						
Coefficient de détermination (R^2)	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Coefficient de Nash-Sutcliffe	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Coefficient de Pearson (r)		✓				
Courbe fréquence-durée		✓				
Biais					✓	



Tableau 12 : Sommaire des statistiques d'évaluation pour la modélisation des débits : coefficient de Nash-Sutcliffe (CNS) et coefficient de détermination (R^2)

Bassin versant/ emplacement	Statistique	Calage			Validation		
		Journalier	Mensuel	Annuel	Journalière	Mensuelle	Annuelle
Ruisseau Black/ exutoire	R^2		0.91				
Rivière Bras d'Henri/exutoire	NSE	0.39			0.44		
Rivière Beaurivage/ exutoire	NSE	0.77			0.75		
	R^2	0.78					
Rivière Lower Little Bow (ruissellement du bassin versant)	NSE		0.72 – 0.67				
	R^2		0.73 – 0.70				
Rivière Salmon/ pont de la route 1	NSE		0.67			0.71	
Rivière Salmon/ Falkland	NSE		0.46			0.58	
Ruisseau Tobacco Sud/ Miami	NSE	0.64	0.76	0.83	0.61 – 0.53	0.72 – 0.65	0.79 – 0.72
Ruisseau Tobacco Sud/ route 240	NSE	0.61	0.74	0.81	0.64	0.75	0.84
Ruisseau Tobacco Sud/ Steppler	NSE				0.21	0.25	0.24
Ruisseau Thomas/exutoire	R^2	0.46					



Tableau 13 : Résumé des pratiques de gestion bénéfiques évaluées dans le cadre de l'EPBH I

	PGB évaluées	Rivière Salmon	Rivière Lower Little Bow	Ruisseau Tobacco Sud/ Steppler	Nation Sud	Bras d'Henri/ Fourchette	Ruisseau Black	Ruisseau Thomas
Zone riveraine	Clôture d'exclusion pour les bovins (et abreuvement à l'écart des cours d'eau)	✓	✓		✓			✓
	Abreuvement à l'écart des cours d'eau (sans clôtures)		✓					
	Pâturage contre récolte mécanique			✓				
Champs	Gestion du fumier		✓			✓		✓
	Travail de conservation et travail classique du sol			✓				
	Rotation des cultures					✓		
	Couverture végétale permanente		✓	✓				
	Utilisation réduite d'herbicides					✓		
Ruissellement	Déviation et voies d'eau gazonnées						✓	
	Détournement d'eaux fluviales (ruissellement autour de la ferme)	**L'EPBH n'est pas un test des effets de PGB individuelles sur différents bassins hydrographiques aux conditions différentes***						✓
	Bassin de retenue (pour le purin)			✓				
	Petits réservoirs			✓				
	Bandes tampons		✓				✓	
	Suite de mesures de contrôle du ruissellement de surface					✓		
Drainage	**Drainage contrôlé par canalisations**				✓			

* **Il est important de souligner que la comparaison des effets de PGB individuelles sur de multiples bassins hydrographiques et/ou l'évaluation d'une PGB quelconque sur un large éventail de bassins hydrographiques aux conditions différentes dépasse la portée de l'EPBH.**



Tableau 14 : Sommaire des données et méthodes employées poor évaluer limpact des PGB sur l'exploration des sédiments et des nutriments dans les bassins versants de l'EPBH I

Bassin versant	Source des données pour les PGB	Données enregistrées à l'exutoire du bassin versant – sédiments, N total, P total
Ruisseau Black	Mesures sur le terrain, développement d'un modèle	Oui
Rivières Bras d'Henri et Beaurivage	Ajustement aux paramètres du modèle	Oui (plus des données sur les pesticides (atrazine) et les coliformes fécaux)
Rivière Lower Little Bow	s.o.	Oui
Rivière Salmon	Ajustement aux paramètres du modèle	Aucune donnée sur les sédiments
Ruisseau Tobacco Sud	Mesures sur le terrain, développement d'un modèle, ajustement aux paramètres du modèle	Oui
Ruisseau Thomas	Ajustement aux paramètres du modèle	Oui

Lacunes et insuffisances

Le tableau 15 présente un résumé des lacunes et insuffisances relatives aux données, à la capacité de modélisation et au calage des modèles.

Les erreurs de calage et de validation des modèles sont attribuables à l'absence de données pluviométriques représentatives dans au moins trois des bassins versants, soit ceux de la rivière Bras d'Henri, du ruisseau Black et du ruisseau Thomas. Le manque de données sur les sédiments a rendu impossible le calage des sédiments par rapport aux données mesurées dans le bassin versant de la rivière Salmon. Il a fallu estimer la charge en sédiments d'après le débit et l'ajustement des paramètres de modélisation. Pour modéliser le bassin de la rivière Lower Little Bow, il faut disposer de renseignements précis sur la quantité d'eau puisée directement dans la rivière Little Bow à des fins d'irrigation, de même que sur la dérivation d'eau du district d'irrigation du nord de Lethbridge vers le bassin de la rivière Lower Little Bow. Malgré la bonne qualité des premiers résultats de calage obtenus, la période de collecte de deux ans s'avère insuffisante pour caler le modèle de débit du bassin versant de la rivière Lower Little Bow, puisqu'elle ne peut saisir les effets éventuels de toute la gamme des variations de précipitations que peut subir la région d'une année à l'autre. Le manque de renseignements sur le drainage par tuyaux enterrés a nui au travail de calage du débit estival des bassins versants de la rivière Bras d'Henri et du ruisseau Thomas. Quatre des études ont connu des problèmes liés à la capacité du modèle SWAT à modéliser le débit et la qualité de l'eau durant les épisodes de fonte hivernale et printanière.

Le modèle SWAT s'est en outre avéré insuffisant pour modéliser adéquatement les effets de PGB structurales, comme les terrasses de déviation et les petits réservoirs; dans ces cas, on doit mettre au point des modèles autonomes. Des améliorations s'imposent également sur le plan de la modélisation des zones riveraines naturelles et des bandes riveraines gazonnées artificielles.



Tableau 15 : Sommaire des lacunes de la modélisation dans les études de modélisation de l'EPBH I, regroupées par problème (et par bassin versant)

Données manquantes ou inadéquates
- Données météorologiques (ruisseau Black, rivière Bras d'Henri, ruisseau Thomas)
- Données sur les sédiments (rivière Salmon)
- Données sur la qualité de l'eau (ruisseau Thomas)
- Renseignements sur le drainage agricole (canalisations) (rivière Bras d'Henri, ruisseau Thomas)
- Données sur les engrais et les méthodes culturales (ruisseau Thomas)
- Période de collecte des données trop courte (rivière Lower Little Bow, ruisseau Thomas)
- Données d'irrigation (rivière Salmon, rivière Lower Little Bow)

Capacité de modélisation insuffisante
- Capacité de modélisation des PGB (rivière Salmon, ruisseau Tobacco Sud, ruisseau Black)
- Terrasses de déviation (ruisseau Black)
- Bandes riveraines, bandes tampons (ruisseau Black)
- Modélisation des petits bassins versants (rivières Bras d'Henri et Beaurivage, ruisseau Tobacco Sud)
- Zones riveraines (ruisseau Thomas)
- Pratiques de semis direct, lessivage des nutriments suite au semis direct (ruisseau Tobacco Sud, rivières Bras d'Henri et Beaurivage)
- Érosion du chenal (ruisseau Thomas)
- Drainage par tuyaux enterrés (rivières Bras d'Henri et Beaurivage, ruisseau Thomas)
- Modélisation du ruissellement printanier (rivière Salmon, ruisseau Thomas)
- Modélisation de la sédimentation et de la qualité de l'eau (ruisseau Black, ruisseau Tobacco Sud)

Problèmes de modélisation
- Incapacité à modéliser l'hydrologie de base (ruisseau Thomas)
- Diversité des statistiques et des méthodes employées pour évaluer les modèles (tous)

Explications et conclusion

Globalement, les études de modélisation ont démontré le bon potentiel des modèles de bassins versants SWAT et GIBSI pour la simulation des processus hydrologiques et de la qualité de l'eau et pour l'évaluation de l'impact des PGB dans les bassins versants agricoles. La figure 6 illustre les utilisations finales possibles des modèles de bassins versants. Ceux-ci pourront servir par exemple à simuler les processus du bassin versant en fonction d'un éventail de pratiques d'occupation du sol et de conditions climatiques futures, mais aussi à évaluer les PGB en vue de les mettre en œuvre ou de concevoir des programmes de gestion du bassin versant. Le modèle créé pour un bassin donné devrait être transférable à d'autres bassins versants de même type.

Le tableau 16 illustre où en sont actuellement la modélisation des bassins versants et l'évaluation des PGB. Malgré certains résultats d'évaluation très positifs (CNS > 0,75), tout indique que la modélisation n'a pas atteint le niveau requis pour servir à l'élaboration de politiques et de règlements, ni pour soutenir des décisions d'investissement. Comme nous l'avons vu, les modèles doivent encore subir plusieurs améliorations.

On peut remédier à la plupart des lacunes relatives aux données et à la capacité de modélisation. D'après une étude du département de l'Agriculture des États-Unis (Moriasi, Arnold, Van Liew, Bingner, Harmel et Veith, 2007), cinq raisons peuvent expliquer pourquoi la modélisation n'atteint pas les résultats escomptés : 1) une variation significative des conditions entre la période de calage et la période de validation; 2) un calage inadéquat ou incorrect du modèle; 3) l'inexactitude des données mesurées; 4) des données d'entrée lacunaires; 5) l'incapacité du modèle à représenter adéquatement les processus qui nous intéressent dans le bassin versant.

Parmi ces raisons possibles, la première (l'évolution des conditions au fil du temps) et la quatrième (la qualité des données) s'appliquent particulièrement à la modélisation réalisée dans le cadre de l'EPBH I. Une seule de ces raisons suffit à compromettre la modélisation. Par ailleurs, on peut toujours améliorer le modèle par des ajouts tels qu'une routine de fonte des neiges particulière, adaptée au climat canadien. Comme on le verra ci-dessous, on peut venir à bout de la plupart des problèmes en y consacrant suffisamment de temps et de ressources.



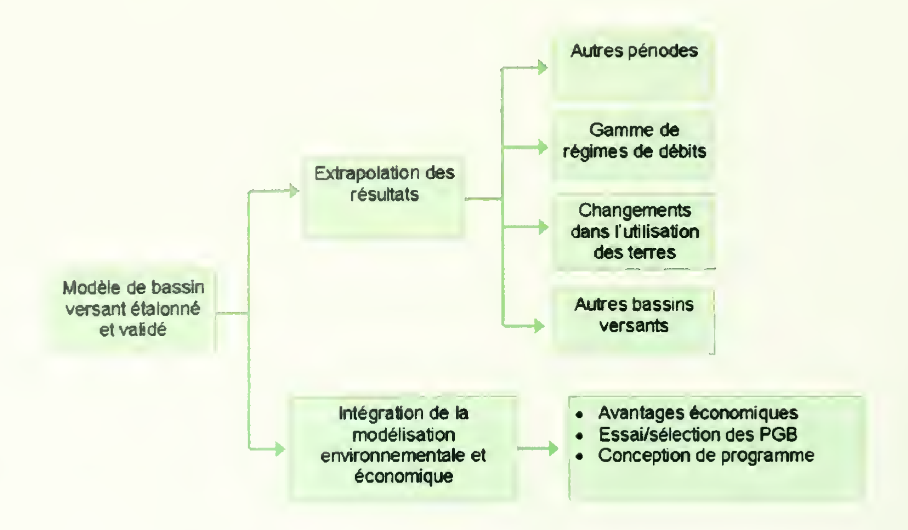


Figure 6 : Applications potentielles des résultats de modélisation de l'EPBH

Considérations relatives aux données

Disponibilité des données - Le manque de données est la raison la plus souvent invoquée pour expliquer un calage moins qu'optimal. Les projets qui ont recours à un système de surveillance continue peuvent combler partiellement cette lacune. Évidemment, les bassins versants surveillés depuis longtemps, comme ceux du ruisseau Tobacco Sud et des rivières Bras d'Henri et Beaurivage, profitent d'une période de collecte plus longue que celle des autres, ce qui permet aux chercheurs de dresser des scénarios de modélisation plus stables. Des dépenses de surveillance supplémentaires pourraient s'avérer indispensables.

Période de collecte - Même basé sur une courte période de collecte, le calage des modèles peut donner de bons résultats, comme en témoignent les études sur les bassins versants du ruisseau Thomas et de la rivière Lower Little Bow. Si les données se limitent à une courte période de collecte, on ne peut cependant couvrir toute la gamme de débits et de conditions climatiques prévue. De toute évidence, il faudra rajuster les paramètres si on veut employer le même modèle dans le cadre d'autres études. Si le programme de surveillance se poursuit, les résultats devraient vraisemblablement gagner en fiabilité au fil du temps, rejoignant ceux des modèles basés sur une période de collecte plus longue.

Une autre solution consiste à déplacer l'étude dans un autre bassin versant, où les données sont recueillies depuis plus longtemps, et à caler le modèle avant de l'appliquer à nouveau dans le bassin d'origine et de le valider par rapport à une période de collecte connue. Par la suite, dans la mesure où on dispose de données sur les précipitations, on pourra employer le modèle pour simuler une période plus longue.

Considérations relatives à la modélisation

Pas de temps - Un examen de la documentation révèle que l'exactitude des résultats de la modélisation peut varier en fonction du pas de temps. On reconnaît généralement qu'un pas de temps mensuel produit de meilleures statistiques d'évaluation que des données de débit journalières. D'après la documentation associée au modèle SWAT, on obtient un meilleur ajustement en utilisant le débit annuel plutôt qu'un pas de temps plus court. C'est ce que semble confirmer la modélisation du ruisseau Tobacco Sud, pour laquelle le CNS s'établit respectivement à 0,64, 0,76 et 0,83 pour le calage du débit journalier, mensuel et annuel du ruisseau à la station de Miami. D'après une autre étude, le pas de temps optimal se situerait entre un et trois mois, ou une saison (Hartmann et Bardossy, 2005). En général, on s'entend à employer le débit mensuel.



Tableau 16 : État de la modélisation des bassins versants et de l'évaluation des PGB

Bassin versant	État actuel
Ruisseau Black	• On a effectué un bon calage de l'hydrologie, des sédiments et des nutriments pour la période précédant la mise en œuvre des PGB. • Il faudra évaluer la qualité de l'eau après la mise en œuvre des PGB. • Des modules efficaces ont été développés pour évaluer les effets des terrasses de déviation et des voies d'eau gazonnées. • Il faudra effectuer d'autres travaux sur le modèle événementiel des bandes riveraines gazonnées.
Rivières Bras d'Henri et Beaurivage	• En général, les statistiques de calage de l'hydrologie s'avèrent adéquates, malgré la tendance du modèle à sous-estimer le débit printanier et l'omission de quelques épisodes pluvieux dispersés dans le bassin versant de la rivière Bras d'Henri. • Il faudra améliorer les routines de drainage par tuyaux enterrés. • Le modèle utilise une gamme d'outils d'évaluation graphiques et statistiques. • Il faut améliorer le calage pour les sédiments et la qualité de l'eau. • Les PGB doivent subir une nouvelle évaluation après la mise à jour du calage.
Rivière Lower Little Bow	• Le calage préliminaire du débit en fonction de scénarios d'irrigation hypothétiques a donné de bons résultats. Aucun calage des sédiments et des nutriments n'a encore été effectué. • Une des étapes critiques consiste à définir la quantité d'eau d'irrigation prélevée dans la rivière Little Bow et le district d'irrigation du nord de Lethbridge, ainsi que le calendrier et l'emplacement des prélèvements. • Le modèle doit être calé à nouveau, à l'aide de la bonne configuration d'irrigation.
Rivière Salmon	• Le calage du modèle en vue de prévoir le débit et la charge de nutriments à l'exutoire a donné de bons résultats. On a terminé l'analyse de sensibilité portant sur les effets de l'épandage d'engrais inorganiques et de fumier. • Le calage du débit et des nutriments dans les sites d'amont donne des résultats mitigés. Il faudra poursuivre les travaux pour arriver à expliquer les variations. • La modélisation de la charge en sédiments a été réalisée d'après des données théoriques. • On a entrepris l'élaboration d'un modèle bactérien. Seule la composante hydrologique a été mise à l'essai. Les travaux d'élaboration du modèle doivent se poursuivre. • Il est impossible de terminer l'évaluation des PGB avant d'avoir effectué un calage satisfaisant du débit, des sédiments et de la qualité de l'eau.
Ruisseau Tobacco Sud	• Le débit, la charge en sédiments et la qualité de l'eau à l'exutoire du bassin versant ont été calés et validés de façon satisfaisante. • Il faut améliorer les résultats de la modélisation des sous-bassins versants d'amont, en particulier le bassin de recherche de Steppler. • Les données tirées du bassin du ruisseau Steppler ont servi à élaborer des renseignements destinés à l'évaluation des effets des PGB. • L'évaluation des PGB semble bien fonctionner à l'échelle du grand bassin versant, mais doit être améliorée à l'échelle locale ou des sous-bassins.
Ruisseau Thomas	• Le modèle a fait l'objet d'un calage pour une courte période de collecte (moins de deux ans), mais il n'a pas été validé. Il faut poursuivre les travaux à l'aide de données supplémentaires. • Le calage de la qualité de l'eau doit être amélioré. • Il faut corriger les lacunes des données. Le traitement des données relatives à l'impact des secteurs résidentiels sur la qualité de l'eau était peut-être inadéquat. • L'évaluation des PGB doit être considérée comme préliminaire et reprise après le calage complet du modèle.



Capacité de modélisation (pertinence du système de modélisation) - Dans l'ensemble, les systèmes de modélisation SWAT et GIBSI ont donné une simulation satisfaisante (et parfois bonne ou très bonne) de l'hydrologie des bassins versants et du transport des sédiments et des nutriments. En outre, ils se sont avérés assez efficaces pour traiter les PGB non structurales. Cela dit, il faut poursuivre les travaux afin d'améliorer la performance des modèles. On peut procéder soit en développant directement le SWAT ou le GIBSI, soit en élaborant des modèles couplés ou autonomes propres à répondre à certaines questions précises ou à analyser un scénario en particulier. L'EPBH I a permis de cerner les domaines où des améliorations s'imposent. On doit notamment mettre au point des modèles ou des routines pour simuler :

1) la fonte des neiges;
2) le drainage par tuyaux enterrés;
3) le ruissellement pluvial par événement;
4) le débit, les sédiments et la qualité de l'eau sur les bandes riveraines;
5) des outils d'évaluation des PGB structurales, comme les terrasses de déviation ou les barrages de retenue du ruissellement, utilisés dans les parcs d'engraissement.

Normes d'évaluation - En l'absence d'une norme de référence, il est impossible d'évaluer les activités de modélisation des bassins versants de l'EPBH avec une quelconque uniformité. La comparaison est d'autant plus difficile que chaque étude emploie ses propres critères.

Effet de l'échelle des bassins versants

Faute de temps et de renseignements pour préparer le présent rapport, il n'a pas été possible de procéder à un examen approfondi de l'effet de l'échelle sur les résultats de la modélisation. Dans divers rapports de projet, les recommandations découragent toutefois l'emploi du modèle SWAT pour modéliser les petits bassins versants. Ces recommandations semblent découler des résultats de certaines études, par exemple la comparaison des résultats de la modélisation de l'exutoire du bassin versant du ruisseau Tobacco Sud, bien supérieurs à ceux de la modélisation du bassin du ruisseau Steppler, beaucoup plus petit, et ce, malgré la mise en place de neuf stations de surveillance dans ce dernier bassin en 2004. On s'attendait à pouvoir obtenir des données utilisables pour modéliser l'hydrologie et la qualité de l'eau du sous-bassin versant, y compris les effets des PGB.

Le succès relatif du calage des grands bassins versants par rapport à celui des bassins plus petits pourrait s'expliquer par le fait que les variations locales ou les erreurs inscrites dans les variables d'entrée, comme la quantité et la fréquence des précipitations, le choix des paramètres d'occupation du sol et d'autres variables, ont tendance à s'aplanir dans les grands bassins versants. Les possibilités de compenser les erreurs abondent dans les grands bassins versants. L'échelle de l'URH pourrait être une autre source d'erreur. Au niveau des sous-bassins versants, il faudrait peut-être chercher à obtenir une meilleure résolution pour l'URH comme pour les données. D'après certaines études récentes (Manoj Jha, 2004; Govindaraju, 2006), les résultats de la modélisation des sédiments et des nutriments s'améliorent au fur et à mesure que diminue la taille de l'URH, jusqu'à un certain seuil. L'évaluation approfondie de l'effet de l'échelle sur les études des bassins versants de l'EPBH I dépasse cependant la portée du présent rapport.

Élargissement de la portée des résultats de la modélisation - La possibilité de transférer les résultats de la modélisation doit être envisagée dans une optique spatiale, temporelle et situationnelle. Les modèles devraient être en mesure de simuler les processus en cours dans les bassins versants dans toute la gamme des variations climatiques, de modéliser diverses solutions structurales et non structurales d'aménagement des terres, de passer de l'échelle du sous-bassin à celle du bassin et de simuler l'écoulement dans les bassins non jaugés. Tout cela nécessite des essais.

Les changements d'occupation du sol ont fait l'objet d'études lors de l'évaluation des PGB dans le cadre de l'EPBH I, mais les données disponibles ne permettent pas de vérifier toutes les évaluations. Le ruisseau Black fait exception, puisque des changements ont été apportés au modèle pour la phase de validation, afin de tenir compte des effets de la mise en place de terrasses de déviation et de bandes riveraines gazonnées durant cette période, ce qui a donné un bon calage. Dans le cas du ruisseau Tobacco Sud, on a utilisé les données recueillies dans le bassin du ruisseau Steppler pour évaluer les PGB et, par la suite, élaborer des routines de simulation des PGB (par exemple l'impact des petits barrages) et des données d'évaluation des PGB.

Il faut tenir compte de la performance du modèle face à la variabilité climatique, y compris la variabilité saisonnière et les périodes de temps chaud, froid, humide ou sec (Hartmann et Bardossy, 2005; Heathman et Larose). Rousseau et coll. ont mis à l'essai le modèle des bassins



versants des rivières Bras d'Henri et Beaurivage dans des conditions de débit estival.

Évaluation des PGB

L'évaluation des PGB dépend de la capacité du modèle du bassin versant à simuler adéquatement les processus physiques et chimiques et à décrire la façon dont les pratiques de gestion bénéfiques peuvent modifier ces processus. L'information servant à évaluer les PGB peut provenir à la fois des collectes de données et expériences réalisées sur le terrain et de l'ajustement des paramètres du modèle. On peut facilement détecter les lacunes de la capacité de modélisation en comparant les valeurs modélisées aux valeurs mesurées, comme on l'a fait dans plusieurs études, notamment celle sur le ruisseau Black. D'autres chercheurs ont eu recours à la capacité interne du modèle pour modéliser les impacts. Pour que ce dernier mode d'évaluation soit acceptable, il faut avoir une bonne compréhension des processus du modèle et une solide confiance en la capacité de celui-ci à simuler correctement les PGB.

Signalons que les relations et la gamme d'ajustements disponibles dans un modèle comme le SWAT proviennent à l'origine de données recueillies sur le terrain, ce qui leur confère une certaine crédibilité. Les coefficients qu'on dérive aujourd'hui d'expériences sur le terrain deviendront les valeurs génériques de demain.

La question de l'utilité des coefficients et des paramètres existants se pose habituellement lorsque les caractéristiques physiques et chimiques du bassin versant subissent un changement qui les porte en dehors de la gamme normale observée durant les expériences. C'est ce qui se passe lorsqu'on met en place une nouvelle PGB ou qu'une PGB subit un changement, par exemple en période de crue ou d'étiage. Il est possible de prévoir ces situations en modélisant les PGB dans un large éventail de conditions. Pour vérifier la performance d'une PGB, il peut s'avérer nécessaire d'assurer une surveillance périodique ou d'élaborer des expériences sur le terrain à cette fin.

Liens entre les études et possibilités de collaboration

Les possibilités de collaboration sont multiples. D'abord, la liste des lacunes de la modélisation comprend plusieurs problèmes communs qu'on aurait avantage à régler en collaboration. En voici quelques-uns :

- Une des possibilités les plus évidentes concerne l'élaboration d'une routine de fonte des neiges adaptée aux climats froids (ruisseau Thomas, ruisseau Black, ruisseau Tobacco Sud et rivière Salmon).
- On pourrait aussi collaborer à l'élaboration d'une routine de drainage par tuyaux enterrés qui puisse éventuellement convenir à la fois aux systèmes de modélisation SWAT et GIBSI (rivière Bras d'Henri, ruisseau Thomas).
- Il est possible de raffiner la modélisation intégrée et d'en élargir l'étendue. Signalons la collaboration déjà en place entre l'équipe de modélisation du bassin des rivières Bras d'Henri et Beaurivage et celle du ruisseau Tobacco.
- On peut encore perfectionner les modèles pour mesurer l'efficacité de PGB telles que les bandes riveraines gazonnées, ou encore mesurer l'efficacité de zones riveraines naturelles en tirant parti de l'expérience acquise durant l'EPBH I.

Conclusions et recommandations

L'EPBH I est un bon départ. Nous avons vu la situation actuelle de l'évaluation des PGB et de la modélisation des bassins versants au tableau 16. Même si les résultats varient d'un projet à l'autre, tous se montrent prometteurs. Voici quelques conclusions générales qu'on peut en tirer, accompagnées de recommandations s'il y a lieu.

1) Plusieurs des études de modélisation réalisées dans le cadre de l'EPBH ont donné des résultats allant de bons à très bons pour la simulation des débits et des résultats acceptables en ce qui a trait au transport des sédiments et des nutriments. On a clairement démontré que les modèles SWAT et GIBSI conviennent à la modélisation des débits et des nutriments dans les bassins versants, mais il faut poursuivre les travaux pour que les résultats puissent servir à la conception de programmes.

- *Soumettre les modèles à des essais dans toute une gamme de régimes de débit saisonniers et pluriannuels, pour tenir compte de la variabilité du climat.*

2) Il a été difficile d'évaluer la qualité des études de modélisation des différents bassins versants de façon à pouvoir les comparer les unes aux autres.

- *Adopter les critères d'évaluation fondés sur les travaux de Moriasi et coll. (2007), indiqués au tableau 10, pour l'EPBH.*
- *Employer les statistiques CNS, PBIAS et RSR appropriées dans le calage et la validation de chaque bassin versant.*

3) Les résultats de la modélisation des PGB à l'échelle de petits bassins versants, comme le bassin de recherche du ruisseau Steppler,



s'avèrent inférieurs aux attentes. Les statistiques d'évaluation du grand bassin versant sont de meilleure qualité que celles du bassin expérimental. Ayant attribué ce problème au modèle, les chercheurs ont proposé des solutions de remplacement. Une partie du problème pourrait cependant provenir d'erreurs de données.

- *La recherche de façons d'améliorer la modélisation du bassin versant du ruisseau Steppler doit passer par l'évaluation du modèle, mais aussi des données.*

4) On a détecté plusieurs lacunes relatives à des données manquantes ou insuffisantes, au manque de capacité et à divers problèmes subis par les modèles.

- *Dans le cadre de l'EPBH II, combler les lacunes de l'EPBH I et faire des recherches sur l'application spatiale et temporelle des modèles.*

5) La période de collecte a une grande importance. Les résultats de modélisation, même de bonne qualité, ne tiendront pas nécessairement la route à long terme s'ils sont fondés sur une période de collecte trop brève, en raison de leur incapacité à tenir compte de la variabilité climatique. Le modèle doit en effet avoir la capacité de simuler le débit durant de longues périodes de temps sec ou humide.

- *Mettre en place un programme de collecte de données afin d'en arriver à une période de collecte suffisante pour établir la confiance envers les résultats de la modélisation, à des fins d'extrapolation spatiale, dans d'autres bassins, et temporelle, dans l'avenir.*

En attendant de disposer d'une base de données adéquate, l'EPBH devra peut-être se pencher sur d'autres aspects de la modélisation. Une autre façon de procéder serait de déplacer la modélisation dans un bassin versant doté de caractéristiques similaires, mais d'une période de collecte plus longue.

6) Il faut élaborer un cadre décisionnel précis pour les futurs projets (notamment ceux de l'EPBH II).

- *Revoir les objectifs à long terme de ce projet particulier. Le schéma de la figure 6 donne quelques exemples de buts et objectifs qu'on peut envisager à long terme.*
- *Dresser un plan de travail pour atteindre ces buts et évaluer chaque projet afin de déterminer sa place dans le schéma à long terme.*

7) Il existe de multiples possibilités de collaboration qui tirent parti de l'expérience acquise durant l'EPBH I et à l'extérieur de l'EPBH.

- *Lancer un appel d'offres portant sur des projets en collaboration susceptibles de résoudre les problèmes de capacité de modélisation.*



Bibliographie

Arabi, M., R. S. Govindaraju, M. M. Hantush et B. A. Engel. Role of Watershed Subdivision on Modelling the Effectiveness of Best Management Practices with SWAT. *Journal of the Amerian Water Resources Association*, 2006.

Hartmann, G., & Bardossy, A. (2005). Investigation of the transferability of hydrological models and a method to improve calibration. Advances in Geosciences.

Heathman, G. C., & Larose, M. (n.d.). Influence of Scale on SWAT Model Calibration for Streamflow. 2747-2753.

Krause, P., D. P. Boyle, & F. Bäse, a. (2005). *Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment.* Retrieved December 2008, from Advances in Geosciences: http://www.adv-geosci.net/5/89/2005/adgeo-5-89-2005.html

Manoj Jha, P. W. (2004). Effect of Watershed Subdivision on SWAT Flow. *Journal of the American Water Resources Association* .

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.* Transaction of the American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Neitsch, S., J.G.Arnold, J.R.Kiniry, Srinivasan, R., & Williams, J. R. (2002). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2000.* Retrieved September 2008, from SWAT Soil and Water Assessment Tool: http://www.brc.tamus.edu/swat/doc.html

Rahbeh, M. (2008). Lower Little Bow Watershed.

Rousseau, A. (2008). Development of the GIBSI integrated modelling framework (economic-hydrologic) and the evaluation of beneficial management practices (BMPs) on the Bras d'Henri and Beaurivage watersheds.

S. Govindaraju, M. M. (2006). Role of Watershed Subdivision on Modelling the Effectiveness of Best Management Practices with SWAT. *Journal of the Amerian Water Resources Association* .

Wanhong Yang, Y. L. (2008). Hydrologic Modelling and Watershed Evaluation of BMPs for the South Tobacco Creek Watershed.

Zhu, J., Broersma, K., Meays, C., & Mazumder, A. (2008). *Salmon River.*





Examen du rapport sur le développement d'une interface ArcGIS pour le système de modélisation économie-hydrologie intégrée

Examen du rapport original intitulé "ArcGIS-Based Interface Development for the Integrated Economic-Hydrologic Modelling System ", rédigé par Wanhong Yang[1], Jing Yang[1], Yongbo Liu[1], Chunping Ou[1], Peter Boxall[2], Marian Weber[3], Jim Yarotski[4] et Mohammad Khakbazan[4], 31 mars 2008

Préparé par : Brian T. Abrahamson
Novembre 2008
Révision : février 2009

[1] Département de géographie, Université de Guelph.
[2] Département d'économie rurale, Université de l'Alberta.
[3] Alberta Research Council.
[4] Agriculture et Agroalimentaire Canada.



Points saillants

- On a développé une interface logicielle qui facilite l'échange de renseignements entre le modèle hydrologique et les modèles économiques (économie à la ferme et comportement des exploitations agricoles) élaborés pour le bassin versant du ruisseau Tobacco Sud.

- Le fait que le modèle hydrologique et les modèles économiques emploient des échelles différentes nuit à leur intégration. Pour résoudre ce problème, on a élaboré une routine basée sur le système ArcGIS, grâce à laquelle on peut convertir les données hydrologiques, qui sont à l'échelle de l'unité de réponse hydrologique (URH), en données à l'échelle de la terre ou de la ferme, telles qu'employées dans les modèles socioéconomiques. À l'inverse, la routine permettra de mettre les données utilisées ou produites par les modèles économiques à l'échelle des URH, employée dans le modèle hydrologique.

- Comme les modèles ont été développés séparément, la base de données de chacun d'eux reste intacte et indépendante des autres.

- L'interface peut servir à élaborer et mettre à l'essai divers scénarios de pratiques de gestion bénéfiques (PGB), par exemple ceux qui sont définis dans le modèle de comportement des exploitations agricoles. Pour ce faire, il suffit de saisir les renseignements requis pour modifier les pratiques de gestion dans chaque parcelle de terrain touchée. L'interface convertit alors les renseignements de façon à évaluer les avantages du scénario dans le modèle hydrologique.

- Le développement de l'interface n'est pas terminé. Il reste encore à intégrer complètement au système les modules de l'économie à la ferme et de comportement des exploitations agricoles.

- Si le développement de l'interface se déroule comme prévu, les chercheurs et les gestionnaires de la conservation auront à leur disposition un outil précieux et même convivial, doté d'écrans d'entrée graphiques et de menus déroulants.



Introduction

Le bassin hydrographique du ruisseau Tobacco Sud est l'un des sept bassins versants canadiens à l'étude dans le cadre de l'Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques (EPBH). C'est aussi un des deux bassins versants choisis aux fins des recherches sur l'intégration de la modélisation économique et environnementale des pratiques de gestion bénéfiques (PGB). L'équipe d'étude a développé un prototype d'interface logicielle basé sur le système ArcGIS dans le but de faciliter le transfert des données entre le modèle hydrologique et les modèles socioéconomiques dans le bassin versant du ruisseau Tobacco Sud. C'est une équipe de l'Université de Guelph qui a développé l'interface; la même équipe a dirigé l'élaboration du modèle hydrologique, décrit dans un autre rapport. La modélisation de l'économie à la ferme et du comportement des exploitations agricoles relève d'une équipe de l'Université de l'Alberta.

Le problème

Les modèles économiques et environnementaux fonctionnent sous des échelles temporelles et spatiales différentes. Les modèles économiques traitent des répercussions de décisions ou d'activités mises en œuvre au niveau de la ferme sur une période d'une ou plusieurs années. L'unité spatiale de base en est la ferme ou le champ. Par contre, les modèles environnementaux comme le SWAT fonctionnent sous un pas de temps journalier et peuvent produire des renseignements en fonction d'un bassin versant tout entier ou d'une unité de réponse hydrologique (URH) à l'intérieur du bassin versant.

Il est relativement facile de faire correspondre des échelles de temps. On peut grouper les simulations journalières du SWAT pour obtenir des résultats mensuels et annuels. Dans le cas du ruisseau Tobacco Sud, le modèle SWAT sert à simuler le débit à l'exutoire, la charge de sédiments et la charge de nutriments du bassin versant selon un pas de temps journalier. Ces données peuvent être exprimées sous forme d'impacts annuels, puis intégrées aux modèles économiques qui caractérisent les effets économiques de la mise en œuvre des PGB sous forme de coûts et d'avantages annuels et pluriannuels.

L'intégration spatiale des données s'avère plus difficile. Les modèles économiques caractérisent la production agricole à l'échelle du champ ou de la ferme, tandis que les modèles environnementaux sont basés sur des limites physiques telles que les sous-bassins. La difficulté réside dans la capacité de transférer les données d'une échelle spatiale à l'autre. Comme il est mentionné dans le rapport d'étude, l'intégration des modèles repose sur un compromis entre les échelles spatiales et temporelles des deux séries de modèles. La figure 7 illustre un cadre de modélisation intégrée proposé dans le rapport original.

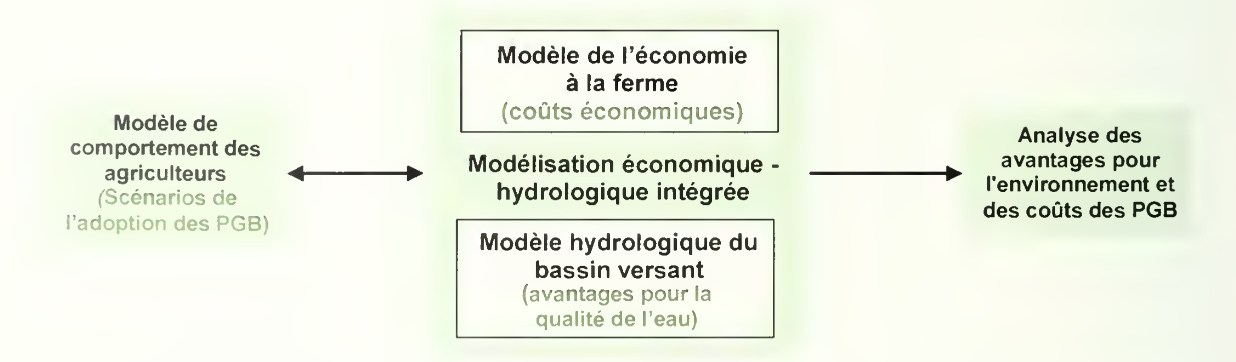


Figure 7 : Cadre de modélisation économique et hydrologique intégrée (Yang et coll. 2007)



La solution

Les auteurs de l'étude ont surmonté le problème de l'échelle spatiale en mettant au point une interface entre les modèles économiques et environnemental, comme l'illustre la figure 8. L'interface peut transférer les données basées sur des unités géospatiales utilisées dans le modèle SWAT, par exemple le sous-bassin, et les unités géospatiales (terrain) employées dans les modèles de l'économie à la ferme et du comportement des exploitations agricoles. On peut ensuite grouper les données concernant les parcelles de terrain au niveau de la ferme, s'il y a lieu.

Le transfert se fait entre les deux unités les plus petites de chaque modèle, soit l'URH et la parcelle de terrain. Comme l'URH englobe plus d'une unité de terrain, elle est habituellement beaucoup plus grande que la parcelle. Il a donc fallu concevoir une méthode pour mettre ces deux unités en rapport. Deux tables de recherche facilitent le transfert. La première établit la relation entre l'URH et la parcelle de terrain, qui définit la superficie et le numéro d'identification de l'URH à laquelle le terrain appartient, ainsi que le pourcentage de l'URH occupé par le terrain. La seconde définit la relation entre le terrain et la ferme et le pourcentage de la ferme qui sera occupé par la parcelle de terrain.

Données sur la gestion des cultures. Le modèle SWAT peut traiter une culture par URH et par année, mais en général, la zone englobée par l'URH renferme plusieurs cultures. En outre, les données sur les cultures sont généralement plus faciles à obtenir à l'échelle du champ que de l'URH. La tâche de convertir les données d'un champ à une URH peut s'avérer ardue, surtout si la période de collecte s'étend sur plusieurs années. C'est pourquoi on a mis au point un module destiné à faciliter le transfert des données sur la gestion des cultures, de l'échelle du champ à celle de l'URH. Le module fonctionne selon deux méthodes, suivant le type de données. Dans le cas d'applications de gestion qu'on peut définir en fonction d'une unité de superficie, comme l'épandage d'engrais ou de pesticides, on utilise pour l'URH la moyenne pondérée de toutes les parcelles de terrain qui composent l'URH. Dans le cas des autres données, comme le choix des cultures ou les pratiques de travail du sol, l'interface utilise la pratique la plus courante.

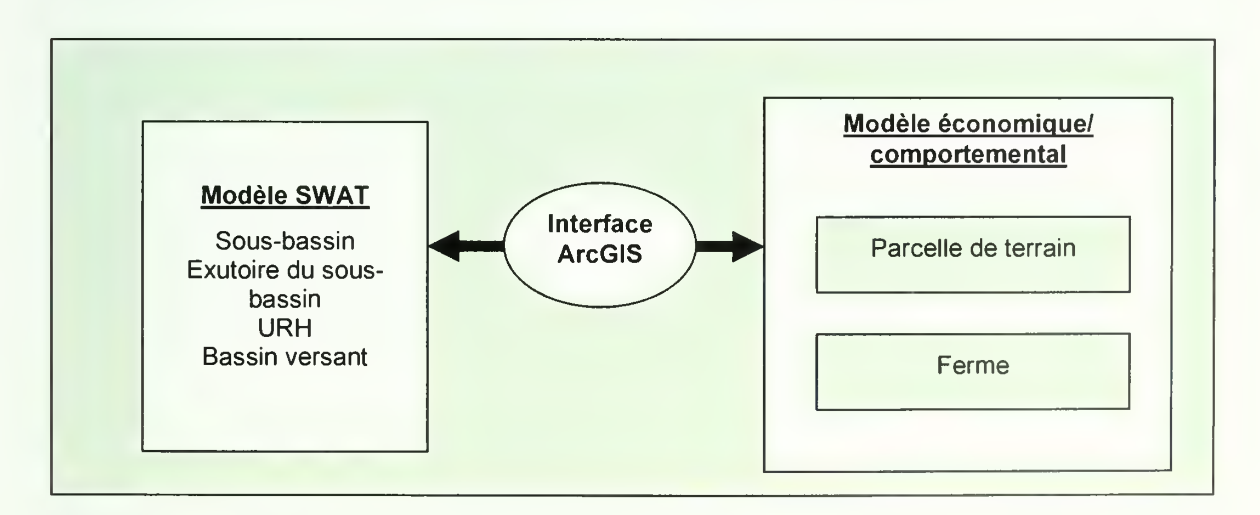


Figure 8 : Cadre de modélisation économiqu et hydrologique intégrée



Modules de l'interface

La conception de l'interface prévoit huit modules, comme l'illustre la figure 9, tirée du rapport principal. On a mis au point un prototype complet des modules de projet, de renseignements, de modèle hydrologique et de modélisation intégrée. Le module de modèle économique est en cours de développement.

Les modules restants seront élaborés dans le cadre de l'EPBH II. Le tableau 17 donne une brève description de la fonction de chaque module.



Figure 9 : Modules employés dans le système de modélisation intégrée ArcGIS. (De gauche à droite : Projet, Renseignements, Modèle hydrologique, Modèle économique, Modèle comportemental, Modélisation intégrée, Outils, Aide).

Tableau 17 : Description des fonctions et des utilisations des modules

Module	Fonctions/utilisations	Situation
Projet	Commencer un nouveau projet ou gérer un projet existant	Prototype
Renseignements	Visualiser les séries de données de base du bassin versant à l'étude	Prototype
Modèle hydrologique	Examiner les données d'entrée, élaborer des scénarios de PGB, simuler des bassins versants et produire des données de sortie	Prototype
Modèle économique	Données et coûts économiques, modélisation économique de la ferme	Prototype partiel
Modèle comportemental	Interroger les données sur le comportement, modéliser le comportement des exploitations agricoles, afficher les probabilités d'adoption des PGB par les exploitants	À développer
Modélisation intégrée[1]	Intégrer les modèles économique et hydrologique afin de simuler des scénarios de PGB actuels et futurs	Prototype
Outils	Gestion des données et maintenance	À développer
Aide	Renseignements sur la façon d'utiliser le système	À développer

[1] À compléter dans le cadre de l'EPBH II, lorsque les modèles économiques deviendront plus accessibles.



Élaboration de scénarios - Une des fonctions majeures du module Modèle hydrologique consiste à élaborer et à mettre à l'essai des scénarios de PGB. Cette fonction définit les scénarios de PGB (gestion ou changement d'occupation du sol) à l'échelle du bassin versant et prévoit la mise en œuvre d'une PGB ou d'une série de PGB en différents endroits du bassin versant. On peut établir des scénarios soit à l'échelle des URH, soit à celle des unités de terrain et de ferme employées dans le modèle économique. La fonction développe des fichiers d'entrée associés au scénario pour les modèles hydrologique et économique, exécute le modèle avec les fichiers mis à jour afin de déterminer les effets environnementaux et économiques, puis affiche les résultats sous forme de série chronologique ou de répartition cartographique. On peut afficher les résultats en fonction d'un terrain, d'un tronçon ou d'un sous-bassin. La fonction de création de scénarios permet à l'utilisateur de mettre à l'essai des scénarios de PGB envisagés, de les modifier et de déterminer leurs répercussions économiques et environnementales.

On peut aussi mettre à l'essai des scénarios d'avenir, comme en témoigne le passage du scénario de changements climatiques (2007-2018), réalisé d'après des données obtenues du modèle ClimGen. Par ailleurs, il est possible d'évaluer les efforts de conservation en cours en créant des scénarios dans lesquels on élimine ces pratiques de conservation. L'utilisateur peut par exemple simuler l'effet provoqué par l'élimination de petits barrages en activant la fonction « pas de barrage ».

Modules Économie à la ferme et Comportement des exploitations agricoles - L'interface permet de structurer les modèles de l'économie à la ferme (modèle économique) et du comportement des exploitations agricoles (modèle comportemental). Le développement de l'interface du modèle économique est partiellement terminé, tandis que l'interface du modèle comportemental devrait être mise au point durant l'EPBH II.

Évaluation de l'interface

Dans l'ensemble, le prototype d'interface semble très utile. Grâce à son concept modulaire, il permet d'aborder le problème de l'intégration du point de vue environnemental ou économique, le modèle environnemental étant à toutes fins pratiques terminé. Le développement de la modélisation de l'économie à la ferme est commencé et on prévoit mettre au point un module pour la modélisation du comportement des exploitations agricoles. Le prototype semble très à même d'anticiper les besoins des utilisateurs en leur offrant un éventail d'outils de gestion, d'analyse et d'affichage des données, y compris les données de sortie du modèle. Tout indique que des essais supplémentaires seront nécessaires. Certains points méritent des commentaires particuliers :

1) D'après le rapport, l'équipe a réussi, à l'aide de l'interface, à convertir 16 ans de données sur la gestion des cultures en données d'entrée pour le modèle SWAT. On estime avoir épargné beaucoup de temps et d'efforts en procédant ainsi. En l'absence de renseignements supplémentaires, il faut supposer que, pour mesurer le succès, les chercheurs se sont fiés uniquement à la capacité démontrée de convertir les données de leur forme originale à une autre, compatible avec le modèle SWAT. En soi, c'est déjà beaucoup, mais il faudrait sans doute élaborer d'autres méthodes de mesure, comme l'explique le point 2.

2) D'après un examen réalisé antérieurement par Fred Martin[1], il faudrait entreprendre un essai de sensibilité afin de déterminer si l'utilisation de la culture dominante a un effet significatif sur les résultats de la modélisation. Si c'est le cas, il faudrait alors apporter des modifications au module. Ce point mérite qu'on s'y attarde, étant donné que l'emploi de la culture dominante est au cœur du transfert de données entre les deux modèles.

3) Pour le moment, l'interface s'adresse aux utilisateurs avertis, notamment les chercheurs, mais, dans l'avenir, on pourrait la proposer aussi bien aux modélisateurs qu'aux gestionnaires de la conservation. Son concept modulaire, ses redondances intrinsèques, comme par exemple la capacité de montrer la distribution des données des différents modules, l'inclusion de scénarios génériques, l'utilisation d'écrans d'entrée et la clarté de la documentation en font une interface conviviale.

[1]Courriel de Fred Martin à Valerie Stuart et coll., 21 mai 2008.



Prochaines étapes

1) Intégrer les modèles de l'économie à la ferme et du comportement des exploitations agricoles au système de modélisation intégrée.

2) Améliorer le module Renseignements de façon à pouvoir visualiser davantage de données sur le site à l'étude.

3) Développer le module Outils pour faciliter la gestion des bases de données, par exemple la mise à jour des données.

4) Dans l'avenir, incorporer les améliorations apportées à la modélisation hydrologique, de l'économie à la ferme et du comportement des exploitations agricoles dans le bassin versant du ruisseau Tobacco Sud et, éventuellement, d'autres bassins de l'escarpement du Manitoba.

5) Intégrer de nouveaux modèles capables de réduire la complexité de la gestion des bassins versants et d'améliorer l'accessibilité pour les utilisateurs. On propose par exemple un modèle hydrologique complètement distribué pour examiner les effets des PGB à des échelles spatiales plus détaillées.

6) Développer des modules de routines d'optimisation dans le système de modélisation intégrée afin de classer les scénarios de PGB en ordre de priorité dans les bassins versants à l'étude.



Examen du Rapport sur la modélisation hydrologique et intégrée à l'échelle du bassin hydrographique des rivières Bras d'Henri et Beaurivage

(Document original : « Développement du système de modélisation intégrée GIBSI (économie-hydrologie) et évaluation de pratiques de gestion bénéfiques (PGB) à l'échelle des bassins hydrographiques Bras d'Henri et Beaurivage, Québec – Rapport final présenté à Agriculture et Agroalimentaire Canada et Canards Illimités Canada » – Alain N. Rousseau[1], Stéphane Savary[1], Sébastien Tremblay[2], Paul Thomassin[2], Laurie Baker[2], Sébastien Rivest[2], Bruno Larue[3], Pascal Ghazalian[3], Eric van Bochove[4])

Préparé par : Brian T. Abrahamson
Février 2009

[1] Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau-Terre et Environnement.
[2] Université McGill.
[3] Université Laval.
[4] Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sainte-Foy (Québec).



Points saillants

- Le bassin versant de la rivière Bras d'Henri est un sous-bassin du bassin versant de la rivière Beaurivage. Leur superficie respective est de 167 km2 et de 742 km2.

- Le bassin de la rivière Chaudière, dans lequel se situent ces deux bassins versants, a fait l'objet de nombreuses études depuis 15 ans. La présente étude tire profit de la base de données étoffée et de la grande expérience en modélisation qui ont résulté de ces travaux.

- Dans le cadre de l'étude, les chercheurs ont saisi les données géographiques et autres, simulé l'hydrologie et la qualité de l'eau et évalué les PGB. Chaque étape fait l'objet d'une documentation détaillée.

- L'unité spatiale de base du modèle hydrologique, soit l'unité hydrologique relativement homogène (UHRH), a une superficie qui s'approche de celle des fermes de la région, ce qui facilite le transfert de données entre les modèles hydrologique et économique.

- L'étude a été réalisée à l'aide du système de modélisation GIBSI, qui comprend un SIG, un modèle hydrologique (HYDROTEL) et des modèles de transport des sédiments, des nutriments, des pesticides et des agents pathogènes. L'interface graphique du modèle GIBSI facilite la gestion des données et l'élaboration de scénarios de PGB.

- Le modèle HYDROTEL a permis de simuler de façon satisfaisante les débits sortants des bassins versants des rivières Beaurivage et Bras d'Henri, malgré une tendance à sous-estimer le ruissellement printanier et l'absence de certains épisodes de crue ou de décrue, sans doute attribuable au manque de données pluviométriques représentatives. En outre, le modèle n'a pas pu saisir les effets des drains agricoles sur le débit estival dans le bassin versant de la rivière Bras d'Henri.

- Les résultats de la modélisation ont fait l'objet d'une évaluation approfondie, réalisée à l'aide de techniques statistiques et graphiques.

- Les tendances des valeurs simulées des sédiments, des nutriments, des pesticides et des agents pathogènes concordaient avec les valeurs mesurées, malgré une forte variation des valeurs absolues. Pour comparer les résultats, on a fait appel à la transformation logarithmique. Les résultats sont jugés adéquats aux fins de l'évaluation des PGB.

- Les chercheurs ont modélisé cinq PGB : 1) l'implantation de bandes riveraines de 1 m, 3 m et 5 m; 2) une réduction de 30 % du taux d'application des pesticides (atrazine); 3) l'usage de rampes à pendillards pour l'épandage du lisier; 4) la conversion des champs de céréales et de maïs en pâturages et cultures de foin; 5) le recours au semis direct dans les champs de maïs.

- Les résultats des PGB dans les UHRH agricoles ont été transmis aux groupes de modélisation économique de l'Université Laval et de l'Université McGill.

- Les PGB ont eu pour effet de réduire la fréquence des dépassements des normes de qualité de l'eau à l'exutoire du bassin des rivières Bras d'Henri et Beaurivage. Environ 12 % des dépassements de la concentration de phosphore provenaient d'un effluent localisé qui se jette dans le cours d'eau.



Introduction

Le bassin des rivières Bras d'Henri et Beaurivage est l'un des sept bassins versants canadiens à l'étude dans le cadre de l'Évaluation des pratiques de gestion bénéfiques à l'échelle des bassins hydrographiques (EPBH). Le bassin de la rivière Bras d'Henri, situé dans le bassin de la rivière Chaudière dans le sud du Québec, est un sous-bassin versant de la rivière Beaurivage. Le bassin versant de la rivière Beaurivage a une superficie de 742 km2. Le sous-bassin de la rivière Bras d'Henri, d'une superficie de 167 km2, compte l'une des plus fortes concentrations de production animale du Québec. Un peu plus de 50 % des sols y sont consacrés aux cultures et aux pâturages, comparativement à environ 36 % dans le bassin versant de la rivière Beaurivage. L'étude sur le bassin versant des rivières Bras d'Henri et Beaurivage est l'une des deux seules études de l'EPBH à examiner la modélisation hydrologique-économique intégrée.

Le modèle GIBSI[1] sert à prévoir la quantité d'eau de ruissellement et sa qualité, à évaluer l'impact de la mise en œuvre de PGB et à fournir un cadre d'intégration de la modélisation hydrologique et économique des PGB dans le bassin versant des rivières Bras d'Henri et Beaurivage.

Parallèlement, des équipes de l'Université Laval et de l'Université McGill développent des modèles agroéconomiques pour ce même bassin versant. Le système GIBSI peut être couplé aux modèles agroéconomiques. L'étude fait beaucoup appel aux paramètres de modélisation mis au point lors d'études précédentes réalisées dans le bassin de la Chaudière.

Données utilisées ou requises pour caler et valider le modèle de bassin versant

La qualité de l'eau et les aspects connexes du bassin versant des rivières Bras d'Henri et Beaurivage sont particulièrement bien documentés, les bassins ayant fait l'objet d'études intensives depuis une dizaine d'années ou plus. En outre, de nombreuses publications traitent de la modélisation des bassins versants en prenant comme exemple les bassins des rivières Beaurivage et Chaudière. Voici un résumé des données disponibles.

[1] Gestion intégrée par bassin versant à l'aide d'un système informatisé.

Données spatiales - Les données spatiales, comme la délimitation des bassins versants, le réseau hydrographique, l'emplacement des stations de surveillance et les données pédologiques et d'occupation du sol étaient gérées par le système SIG PHYSITEL.

Les chercheurs ont subdivisé le bassin versant en unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH) d'une superficie d'environ 105 hectares chacune, à l'aide d'un modèle altimétrique numérique (MAN) de 20 m de résolution et d'une délimitation détaillée du réseau hydrographique. Les UHRH représentent des surfaces discrètes de ruissellement qui alimentent un tronçon en particulier dans le réseau hydrographique. La superficie des UHRH s'approche de celle des fermes de la région. Le bassin versant de la rivière Beaurivage comprend 675 UHRH et celui de la rivière Bras d'Henri, 141 UHRH.

En vue d'intégrer les modèles hydrologique et économiques, il est important de délimiter des UHRH de taille semblable à celle des fermes de la région. Étant donné que les modèles économiques fonctionnent à l'échelle de la ferme, on obtient ainsi deux modèles basés sur une même échelle spatiale, ce qui facilite le transfert de renseignements entre les deux.

Les données d'occupation du sol proviennent d'une carte des classes d'occupation agricole du sol, générée à partir d'images Landsat de 2003 associées à une carte de 2007 obtenue de la Financière Agricole du Québec.

Les données pédologiques sont tirées de cartes de polygones pédologiques couvrant le bassin versant. La méthode employée pour adapter les données aux UHRH consiste à superposer les UHRH aux polygones pédologiques, puis à déterminer les propriétés physicochimiques du sol de l'UHRH à partir de la moyenne pondérée des polygones.

Données météorologiques - Les chercheurs disposaient de registres provenant de sept stations météorologiques situées sur le périmètre du bassin versant de la rivière Beaurivage. Aucune de ces stations ne se trouve dans le bassin versant de la rivière Bras d'Henri.

Données hydrométriques - Les chercheurs avaient accès à des données hydrométriques recueillies depuis 1972 près de l'exutoire des deux bassins versants et, depuis 1999, à un point du bassin versant de la rivière Bras d'Henri.



Données sur la qualité de l'eau - Les données sur la qualité de l'eau sont recueillies près de l'exutoire du bassin versant des rivières Bras d'Henri et Beaurivage depuis 1982 et dans une station plus centrale du bassin versant de la rivière Bras d'Henri depuis 1999. On dispose de données sur le phosphore particulaire et dissous, les matières en suspension, l'azote total, les nitrites et les nitrates, l'azote (NH4-NO3), la turbidité, les coliformes fécaux et la chlorophylle a. Les données sur la qualité de l'eau n'étaient pas continues.

Une station auxiliaire, située près de l'exutoire du bassin de la rivière Beaurivage, a fourni des données supplémentaires sur la qualité de l'eau depuis 1988 et des données hydrométriques depuis 1972. Les stations hydrométriques et de suivi de la qualité de l'eau sont exploitées par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP).

Calage, validation et évaluation

La modélisation réalisée à l'aide du système GIBSI visait à prévoir le débit journalier occasionné par les précipitations et les caractéristiques physiographiques du bassin versant, la charge et la concentration de sédiments et de nutriments (azote et phosphore), le transport et le devenir des pesticides et la migration des agents pathogènes (coliformes) du champ au cours d'eau. La figure 10 illustre de façon schématique la séquence de modélisation du système GIBSI.

Figure 10 : Schéma du modèle GIBSI et d'une séquence de modélisation



Hydrologie - À l'aide du modèle HYDROTEL, une des composantes du GIBSI, les chercheurs ont calé et validé les débits à proximité de l'exutoire des rivières Bras d'Henri et Beaurivage pour les périodes indiquées au tableau 18.

Étant un modèle distribué, HYDROTEL peut prendre en considération la variabilité spatiale des caractéristiques physiographiques du bassin versant et attribuer des valeurs à chaque UHRH, dans la mesure où la résolution des données est suffisante pour définir des valeurs de paramètres caractéristiques, comme la profondeur des couches de sol et d'autres paramètres de calage d'intérêt dans chacune des UHRH. Cependant, en l'absence de renseignements physiographiques détaillés, il demeure acceptable de fournir des valeurs de calage des paramètres identiques à ces variables à une plus grande échelle. Dans le cadre de l'étude, les chercheurs ont regroupé les UHRH dans le bassin versant de la rivière Bras d'Henri. Ces groupes ont servi à modéliser le débit de sortie de ce bassin versant et à caler les débits du bassin versant de la rivière Beaurivage.

Les chercheurs ont fait une évaluation très approfondie des données de sortie de la modélisation, en utilisant le coefficient de détermination (R^2), le coefficient de Nash-Sutcliffe (CNS) et le coefficient de corrélation de Pearson pour comparer les débits simulés et observés. Le tableau 19 montre les résultats de ces comparaisons, effectuées sur diverses périodes.

La vérification de la performance du modèle comportait plusieurs autres étapes. On a notamment comparé les résultats de la modélisation avec ceux d'une étude réalisée précédemment dans le bassin de la rivière Chaudière, effectué des simulations à long terme (1979-2004) et évalué la performance du modèle dans la prévision des débits estivaux (de mai à octobre) durant cette même période.

Les chercheurs ont également comparé les résultats de la modélisation de façon graphique, en traçant les courbes de fréquence cumulée et de récurrence des débits simulés en fonction des débits mesurés. Cette méthode s'est avérée très utile pour évaluer visuellement les résultats de la modélisation par rapport aux résultats mesurés sur une période suffisamment longue pour couvrir toute une gamme de conditions météorologiques.

En conclusion, les chercheurs estiment que les résultats de la modélisation sont satisfaisants pour simuler les PGB dans les deux bassins versants, mais reconnaissent que le modèle a tendance à sous-estimer les débits de pointe associés au ruissellement printanier et aux épisodes de pluie dans les deux bassins versants, bien que les simulations s'avèrent plus exactes dans le bassin de la rivière Beaurivage que dans celui de la rivière Bras d'Henri. En raison de la sous-estimation constante des débits en période de crues printanières, l'évaluation des PGB dans le bassin de la rivière Bras d'Henri s'est limitée à la période estivale (du 1er mai au 31 octobre).

Érosion et qualité de l'eau – À l'aide des modèles Erosion, PoPes et TransPath, on a estimé les exportations de nutriments, de pesticides et d'agents pathogènes des sols agricoles de chaque UHRH, puis combiné ces exportations dans le modèle QUAL2E afin de déterminer le transport et le devenir des polluants en rivière. En combinant ensuite les données de sortie des UHRH, on a obtenu une estimation de la charge totale en bordure des champs (écoulement de surface).

Tableau 18 : Statistiques d'évaluation utilisées dans la simulation de l'écoulement dans le bassin versant des rivières Beaurivage et Bras d'Henri

	Beaurivage	CNS	R^2	Bras d'Henri	CNS	R^2	r	Commentaires
Calage	1984-1989	0.79		1995-1999	0.39			
Validation	1989-1994	0.75		1999-2004	0.44			
Combinés	1984-1994	0.77	0.78	1995 -2004	0.42	0.48		
Long terme	1979-2004	0.77	0.77	1979-2004	0.47	0.53		Y compris les PGB (1980-1999) et les données de qualité de l'eau (1988-2004)
Étiage	1979-2004	0.76	0.77	1979-2004	0.52	0.57		Du 1er mai au 31 octobre



Tableau 19 : Évaluation de la modélisation des sédiments à l'exutoire du bassin versant des rivières Beaurivage et Bras d'Henri

Critère d'évaluation	Beaurivage				Bras d'Henri			
	1989		1996		1988		1989	
	Conc.	Load	Conc.	Load	Conc.	Load	Conc.	Load
R^2	0.22	0.94	0.84	0.61	0.02	0.00	0.27	0.61
Nash-Sutcliffe	-1.05	0.67	0.42	0.27	-0.25	-0.11	0.20	0.45
Pearson (r)	0.47	0.97	0.91	0.78	0.13	0.04	0.52	0.78
Fréquence totale[1]	0.90	0.69	0.64	0.55				

L'écoulement de surface provenant des UHRH agricoles représente l'apport des exploitations agricoles, composante essentielle des études socioéconomiques, lesquelles exigent des données à l'échelle de la ferme. En l'absence de données mesurées en bordure des champs pour vérifier l'écoulement de surface, les chercheurs ont évalué la modélisation de l'érosion et de la qualité de l'eau au moyen de simulations faites dans QUAL2E et de données mesurées à proximité de l'exutoire des bassins versants.

Les paramètres de modélisation de l'érosion et de la qualité de l'eau sont dérivés de ceux qu'on avait élaborés et vérifiés lors d'une étude précédente du bassin de la rivière Chaudière. Voici quelques explications relatives aux résultats de la modélisation des exportations par l'écoulement de surface et de la qualité de l'eau en rivière dans les deux bassins versants.

Érosion (sédiments) - Compte tenu du rôle majeur que joue le transport des sédiments dans la migration des polluants à l'intérieur des bassins versants, l'estimation de l'érosion prend un caractère essentiel. En outre, l'érosion dépend fortement du débit. Toute erreur qui se glisse dans la modélisation des débits se répercute sur la modélisation des sédiments. Pour modéliser les exportations de sédiments résultant de l'érosion des champs, ainsi que la charge de sédiments en rivière et la concentration de sédiments à l'exutoire du bassin versant des rivières Bras d'Henri et Beaurivage, les chercheurs ont utilisé les modèles Erosion et QUAL2E.

Le rapport présente les résultats de la modélisation des sédiments à l'exutoire du bassin versant de la rivière Bras d'Henri en 1988 et 1989 et à l'exutoire de la rivière Beaurivage en 1989 et 1996. Le tableau 19 illustre les résultats de la modélisation des sédiments. On y remarque des résultats mitigés, les simulations de 1989 ayant produit les meilleurs résultats dans les deux bassins.

La modélisation a donné de meilleures prévisions pour la charge en sédiments que pour la concentration de sédiments. Signalons que les charges en sédiments ont fait l'objet d'une simulation à long terme (1998-2004), dont les résultats ont été comparés aux mesures disponibles pour cette période. Le rapport d'étude présente ces résultats, accompagnés d'une analyse statistique.

Les chercheurs ont utilisé deux autres méthodes bien documentées pour estimer la charge en sédiments : un estimateur quotient, qui estime la charge en fonction du débit, et un estimateur statistique. Dans les figures 11 et 12, on a fait appel à une échelle logarithmique pour comparer les charges journalières en sédiments estimées, simulées et mesurées à l'exutoire du bassin versant des rivières Beaurivage et Bras d'Henri.

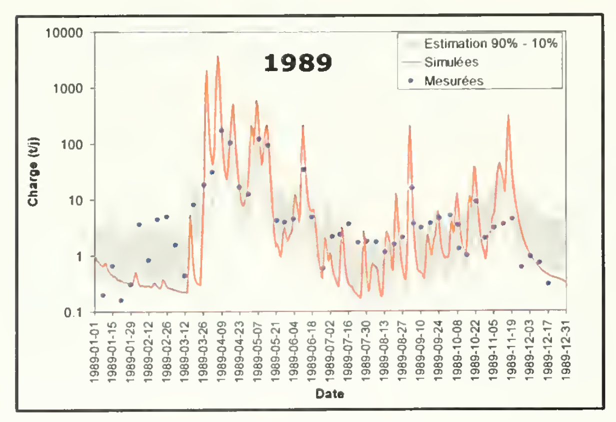
Les auteurs concluent que le modèle présente un comportement jugé acceptable « puisqu'il respecte les ordres de grandeur des concentrations mesurées et estimées. De plus, la dynamique générale tout au long de l'année reste relativement bien reproduite par le modèle. »

Nutriments - Les chercheurs ont simulé les exportations de phosphore (total, dissous et organique) et d'azote ($NO_2^- + NO_3^-$) des sols agricoles à l'aide du modèle de pollution (PoPes) et la qualité de l'eau en rivière à l'exutoire des bassins versants à l'aide du modèle QUAL2E.

Le rapport donne des exemples d'exportations journalières obtenues par modélisation du

[1] Probabilité de se situer entre les quantiles 10 % et 90 %.





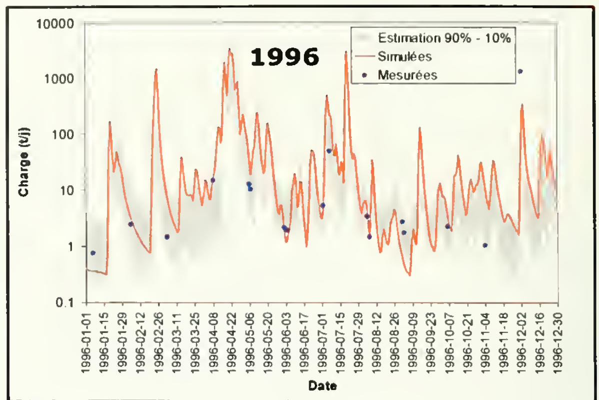


Figure 11 : Charges journalières en sédiments (tonnes/jour) simulées, estimées[1] et mesurées à l'exutoire du bassin versant de la rivière Beaurivage en 1989 et 1996

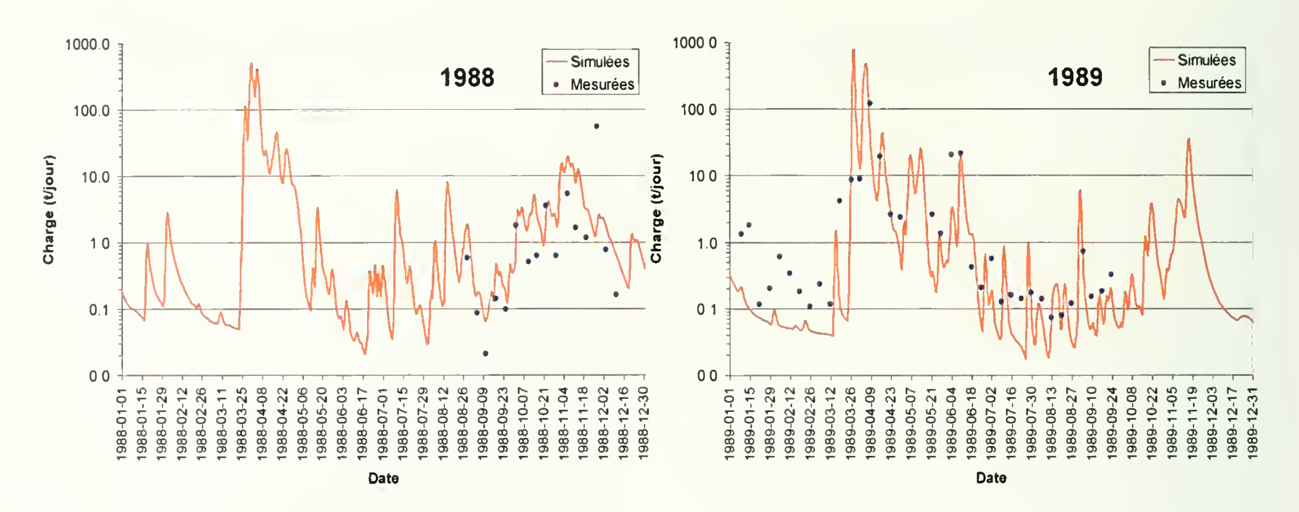


Figure 12 : Charges journalières en sédiments (tonnes/jour) simulées et mesurées à l'exutoire du bassin versant de la rivière Bras d'Henri en 1988 et 1989

phosphore et de l'azote dans les bassins des rivières Bras d'Henri (1988 et 1989) et Beaurivage (1989 et 1990). Il fournit en outre des évaluations statistiques pour les années qui ont produit les meilleurs résultats dans le bassin des rivières Bras d'Henri (1989) et Beaurivage (1990). Les figures 13 et 14 illustrent les simulations faites dans le bassin de la rivière Bras d'Henri pour 1988 et 1989. Le tableau 20 présente les résultats de la modélisation du phosphore total, du phosphore dissous et du phosphore organique, ainsi que la charge d'azote total à l'exutoire du bassin versant des rivières Beaurivage et Bras d'Henri pour certaines années choisies. La performance du modèle en période d'étiage (de mai à octobre) pour les années 1988 à 2004 a aussi été examinée.

Le choix de la période de mai à octobre se justifie par l'intention de réduire au minimum l'effet de la sous-estimation du débit et des sédiments durant les crues printanières. Même si on disposait aussi de renseignements sur la concentration à l'exutoire de chaque bassin versant, les statistiques d'évaluation n'étaient généralement pas disponibles. La simulation des charges en nutriments se comparait plus favorablement aux valeurs mesurées que les concentrations simulées.

[1] Charge estimée au moyen de l'analyse de distribution statistique.



Tableau 20 : Résultats de la modélisation de la qualité de l'eau à l'exutoire du bassin versant des rivières Beaurivage et Bras d'Henri pour certaines périodes choisies

Composante de la qualité de l'eau	Beaurivage			Bras d'Henri			Commentaires
	Période	R^2	Pearson (r)	Period	R^2	Pearson (r)	
P total	1990	0.58	0.76	1989	0.64	0.80	Charges
P total	1988 à 2004	0.34	0.58	1988 à 2004	0.18	0.43	Charges (mai à octobre)
P dissous	1990	0.36	0.60	1989	0.74	0.86	Charges
P dissous	1988 à 2004	0.24	0.49	1988 à 2004	0.16	0.40	Charges (mai à octobre)
P organique	1990	0.83	0.91	1989	-0.14	0.30	Charges
P organique	1988 à 2004	0.31	0.55	1988 à 2004	0.09	0.30	Charges (mai à octobre)
NO_3^- NO_2^-	1989	0.77	0.88	1988	0.28	0.53	Charges
NO_3^- NO_2^-	1990	0.89	0.95	1989	0.37	0.51	Charges
NO_3^- NO_2^-	1988 à 2004	0.58	0.76	1998 à 2004	0.26	0.51	Charges (mai à octobre)

La figure 13 montre l'importante variation observée entre les valeurs simulées de concentration et de charge de phosphore total dissous et les valeurs mesurées à proximité de l'exutoire du bassin versant de la rivière Bras d'Henri. Le rapport conclut en affirmant que « les ordres de grandeur demeurent globalement respectés et ce plus précisément pour la simulation des charges mesurées ».

Dans les figures 15 et 16, on voit que le modèle de transport des nutriments a tendance à surestimer la concentration et la charge d'azote (NO_2^- + NO_3^-). Les auteurs de l'étude signalent que les valeurs simulées de concentration et de charge affichent des variations significatives comparativement aux valeurs mesurées à proximité de l'exutoire de la rivière Bras d'Henri, mais concluent, comme dans le cas du phosphore, que l'ordre de grandeur des valeurs mesurées demeure relativement inchangé, surtout pour les périodes d'étiage estivales.

D'après l'étude, les variations pourraient être en partie attribuables à des inexactitudes des données de sortie des modèles de débit et d'érosion. En outre, la charge en phosphore et en azote dépend fortement de la quantité d'engrais appliqué et de la date d'application, deux éléments dont les données d'entrée ne tiennent pas nécessairement compte.

Pesticides - Les chercheurs ont modélisé le transport et le devenir des pesticides en milieu terrestre à l'aide du modèle PoPes. Le transport des pesticides est fonction de la quantité de sédiments provenant de l'érosion hydrique du sol et du mouvement de l'eau en surface et sous la surface, pour différentes classes d'occupation agricole du sol. En raison de l'incertitude associée à la modélisation de l'écoulement de surface et des sédiments, les chercheurs ont eu du mal à définir des valeurs absolues, mais ils concluent néanmoins que « les ordres de grandeur des concentrations et charges simulées respectent ceux des concentrations et charges mesurées à proximité de l'exutoire du bassin versant de la rivière Beaurivage ».

Pathogènes (coliformes fécaux) - Pour modéliser le transport des coliformes fécaux, les chercheurs ont utilisé le modèle TransPath, qui simule l'excrétion des coliformes fécaux contenus dans les excréments animaux et leur migration vers les cours d'eau. La modélisation pour les années 2003 et 2004, réalisée à une station située au centre du bassin versant de la rivière Bras d'Henri, a été faite d'après des données recueillies dans le cadre du projet d'EPBH.

On voit à la figure 17 que le modèle TransPath surestime la concentration des coliformes fécaux au cours de la période d'activité agricole; malgré tout, les auteurs du rapport estiment que « la performance du modèle demeure acceptable autour des fortes concentrations en coliformes (1 000 UFC/100 mL) ».



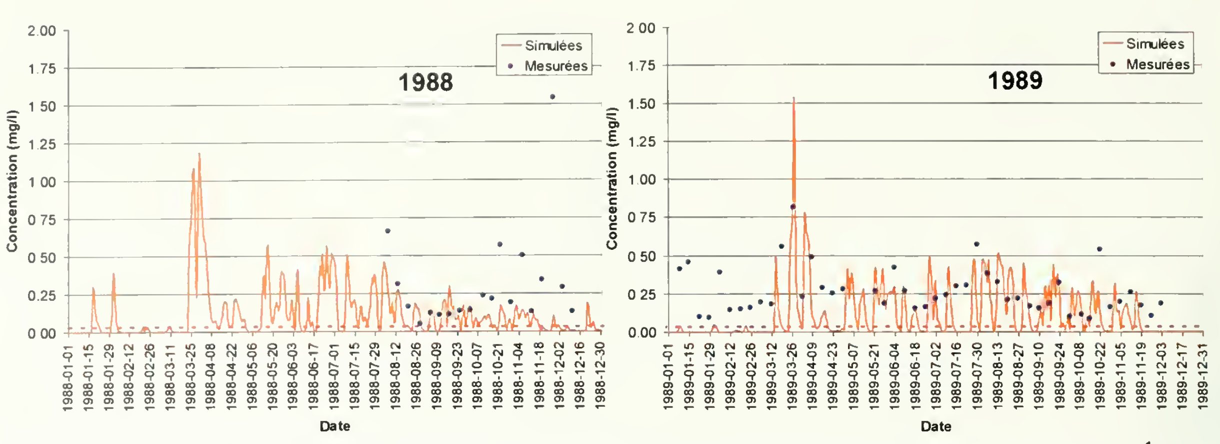


Figure 13 : Comparaison des concentrations journalières de phosphore total simulées et mesurées[1] (mg/L) pour 1988 et 1989 à proximité de l'exutoire de la rivière Bras d'Henri

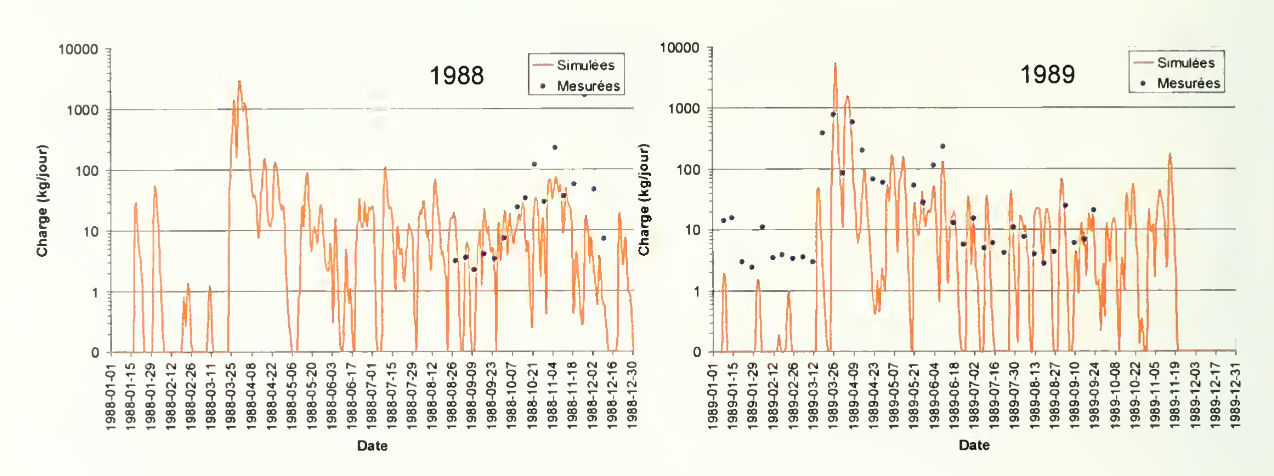


Figure 14 : Comparaison, sur une échelle logarithmique, des charges journalières de phosphore total (kg/jour) simulées et mesurées pour 1988 et 1989 à proximité de l'exutoire de la rivière Bras d'Henri

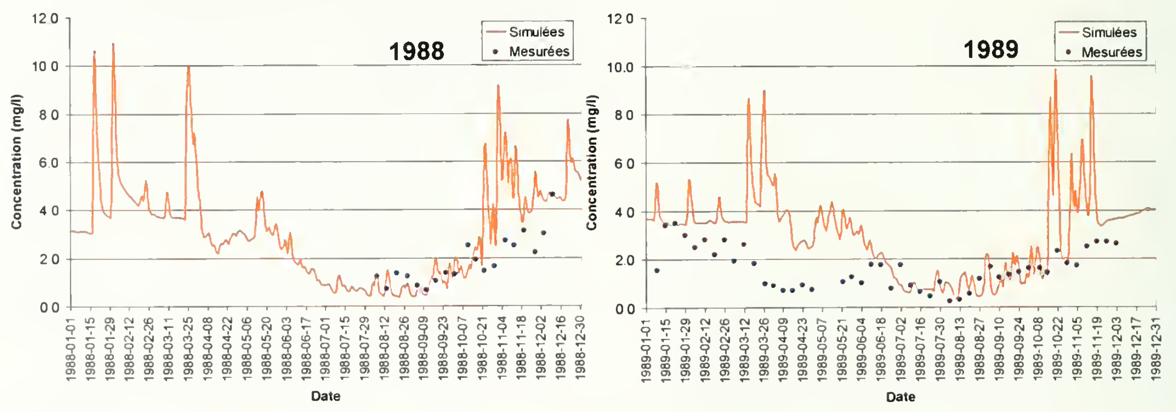


Figure 15 : Comparaison des concentrations journalières d'azote (NO_2^- + NO_3^-) (mg/L) simulées et mesurées pour 1988 et 1989 à proximité de l'exutoire de la rivière Bras d'Henri

[1] Charge estimée au moyen de l'analyse de distribution statistique.
iquent la qualité de l'eau à un moment précis. Les concentrations simulées sont des moyennes journalières.



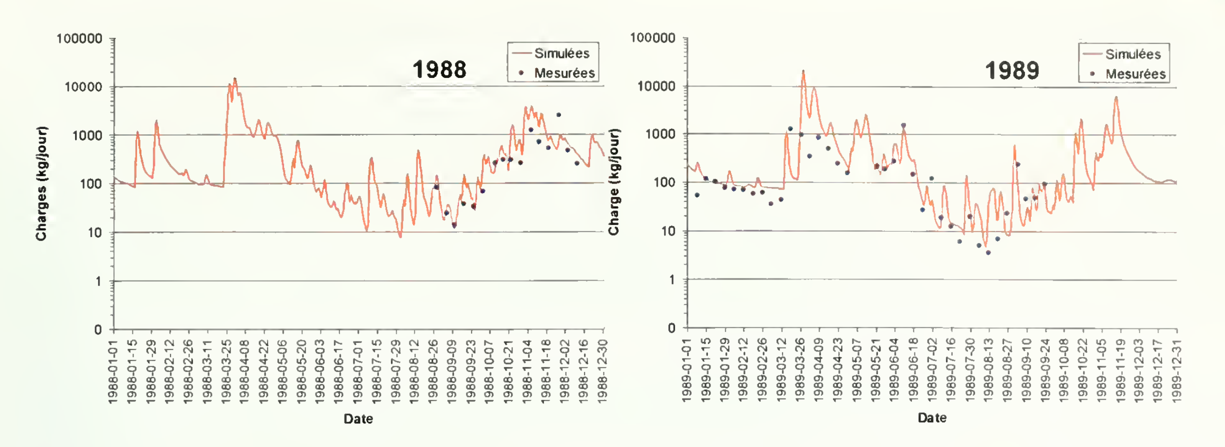


Figure 16 : Comparaison des charges journalières d'azote (NO_2^- + NO_3^-) (mg/L) simulées et mesurées pour 1988 et 1989 à proximité de l'exutoire de la rivière Bras d'Henri

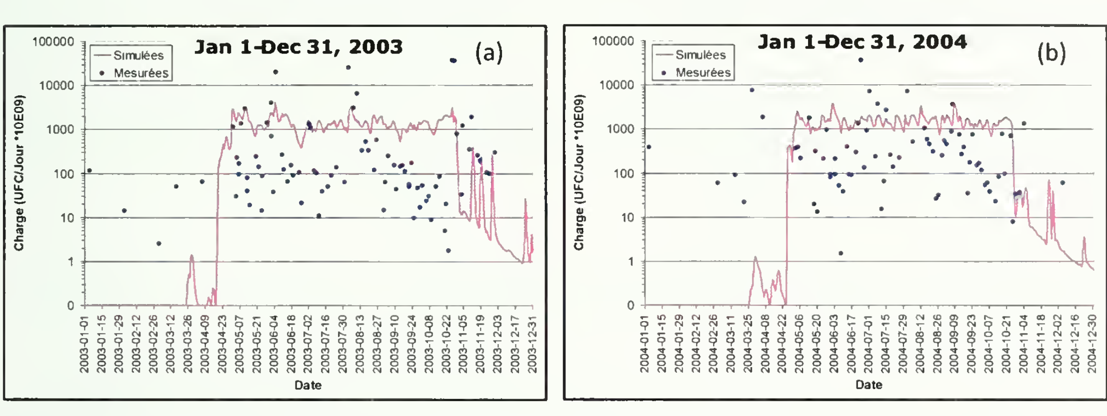


Figure 17: Comparaison des charges journalières en coliformes fécaux simulées et mesurées à la station 0234009 du MDDEP pour les années 2003 (a) et 2004 (b)

PGB (choix et évaluation)

L'étude évalue cinq PGB : l'implantation de bandes riveraines de 1 m, 3 m et 5 m, la réduction de 30 % du taux d'épandage de pesticides (atrazine sur le maïs), l'application de lisier au moyen de rampes à pendillards, la conversion des cultures de maïs et de céréales en pâturages et en foin, et le recours au semis direct dans les champs de maïs. En modifiant les données d'entrée des modèles, on peut évaluer les impacts de toutes ces PGB.

C'est ce qu'on a fait pour la période de 1980 à 1999[1], à l'aide des modèles calés pour simuler la charge et la concentration de sédiments et de nutriments à l'exutoire des rivières Bras d'Henri et Beaurivage, de même que les charges exportées au sol dans la majorité des UHRH agricoles du bassin versant de la rivière Bras d'Henri. Pour obtenir le taux de variation, on a comparé les résultats de la modélisation à un scénario de référence dans lequel aucune PGB n'entrait en jeu. On a comparé les concentrations simulées à l'exutoire des bassins versants aux critères de qualité de l'eau (par exemple les normes provinciales) définis pour les sédiments, le phosphore total, l'azote, l'atrazine et les coliformes fécaux. Les résultats figurent dans les tableaux 21 et 22.

Épandage d'engrais - Après avoir examiné le bilan des nutriments dans le bassin versant de la rivière Bras d'Henri, les chercheurs ont déterminé que les apports de nutriments par l'épandage de fumier et de lisier excédaient les besoins des cultures. L'application d'engrais en fonction de la demande des cultures permettait de réduire la charge en phosphore exportée au sol et dans les cours d'eau. D'après l'étude, « cette pratique courante d'épandage selon la demande devrait s'inscrire comme scénario de référence ou encore comme PGB afin de mieux s'accorder avec les règles d'épandage observées sur le terrain ».

[1] Les scénarios d'accès aux cours d'eau relatifs aux coliformes fécaux ont été modélisés pour la période allant de 2000 à 2006.



Tableau 21 : Réduction (%) des exportations de sédiments, de nutriments et de pesticides résultant de la mise en œuvre de PGB dans les bassins versants[1]

	Écoulement de surface				Exutoire du bassin de la rivière Bras d'Henri				Exutoire du bassin de la rivière Beaurivage			
	Sédiments	P total	N total	Pesticides	Sédiments	P total	$NO_2^- NO_3^-$	Pesticides	Sédiments	P total	$NO_2^- NO_3^-$	Pesticides
Bandes riveraines de 1 m	37	28	40	32	10	29	58	40	10	29	56	42
Bandes riveraines de 3 m	51	41	52	44	16	41	68	53	13	41	67	56
Bandes riveraines de 5 m	59	48	58	51	19	49	72	62	15	49	71	64
Réduction de 30 % de l'atrazine				30				37				39
Épandage de lisier avec pendillards			1				1				1	
Conversion en pâturages et foin	65	72	47		26	72	17		16	60	30	
Semis direct (maïs)	20	19	12		8	18	0		0	9	2	

Tableau 22 : Impact des scénarios de PGB sur la probabilité de dépassement des critères de qualité de l'eau et la réduction des charges totales moyennes exportées à l'exutoire du bassin versant de la rivière Beaurivage[2]

	Probabilité de dépassement (réduction de la charge exportée en rivière) (%)			
	Sédiments	**P total**	**$NO_2^-NO_3^-$**	**Pesticides**
Référence	27%	85%	0%	4.6%
Bandes riveraines de 1 m	23% (10%)	82% (29%)	0% (56%)	2.2% (42%)
Bandes riveraines de 3 m	22% (13%)	80% (41%)	0% (67%)	1.3% (56%)
Bandes riveraines de 5 m	21% (15%)	78% (49%)	0% (71%)	0.8% (64%)
Réduction de 30 % de l'atrazine	-	-	-	2.6% (39%)
Épandage de lisier avec pendillards	-	-	0% (+1.26%)	-
Conversion en pâturages et foin	20% (16%)	74% (60%)	0% (30%)	0% (100%)
Semis direct	27% (0%)	85% (9%)	0% (0.07%)	4.5% (0.8%)

[1] Apparemment, les PGB n'ont eu qu'un impact minime sur le transport des coliformes. Ce résultat est en partie attribuable à la faible limite de détection.

[2] Tiré de Rousseau et coll. (2008). *Développement du système de modélisation intégrée GIBSI (économie-hydrologie) et évaluation de pratiques de gestion bénéfiques (PGB) à l'échelle des bassins hydrographiques Bras d'Henri et Beaurivage, Québec*, tableau 5.16.



Modélisation intégrée

La modélisation a permis de déterminer l'impact des PGB dans toutes les UHRH agricoles. Par analyse statistique des charges journalières moyennes en sédiments, en phosphore, en azote et en pesticides, on a déterminé le taux de variation des exportations en bordure des champs résultant de l'application de PGB dans les UHRH agricoles durant la période d'étude. Les résultats ont été transférés dans les modèles agroéconomiques mis au point par les équipes de l'Université Laval et de l'Université McGill.

Principales conclusions sur la modélisation hydrologique-environnementale

Les résultats de la modélisation contribuent à la compréhension des impacts des PGB sur la qualité de l'eau des bassins versants. Voici quelques-unes des principales conclusions :

1) Le modèle HYDROTEL a la capacité de simuler les débits à l'échelle des bassins versants, mais il s'avère moins efficace quand il s'agit de reproduire certains phénomènes de ruissellement. Le modèle a tendance à sous-estimer les crues printanières. Comme les erreurs se sont répercutées sur les modèles Erosion et PoPes, elles ont provoqué de nouvelles inexactitudes dans les données de sortie de ces deux modèles.
2) Le modèle a la capacité d'évaluer les impacts des PGB sur le transport des sédiments et des nutriments en milieu terrestre, mais, en l'absence de données mesurées en bordure des champs, il a été impossible de vérifier les résultats directement. Les mesures des charges et des concentrations en rivière ont servi à valider le modèle.
3) On peut coupler le modèle GIBSI à certains modèles agroéconomiques. Dans le cadre de cette étude, les données qui décrivent le taux de changement des exportations de sédiments, de nutriments et de pesticides en bordure des champs ont été transférées dans les modèles de l'économie à la ferme et du comportement des exploitations agricoles.
4) C'est la conversion des cultures annuelles en pâturages et en foin qui a eu l'impact le plus marqué sur la charge en phosphore en bordure des champs et à l'exutoire des bassins versants : on a obtenu une réduction de 60 % par rapport au scénario de référence.
5) D'après l'étude, 25 % en moyenne de la concentration de phosphore total à l'exutoire du bassin de la rivière Beaurivage provient de sources ponctuelles telles que les effluents d'installations publiques de traitement des eaux usées. À elles seules, ces sources ponctuelles de phosphore occasionnent une probabilité de dépassement de 12 % du critère de qualité de l'eau pour le phosphore total.

Lacunes et insuffisances de la modélisation environnementale

Le rapport donne des explications très détaillées sur chaque thème abordé, y compris la saisie des données, le système de modélisation GIBSI, la simulation des débits, des sédiments et de la qualité de l'eau et l'évaluation des PGB. Il fait état en outre plusieurs problèmes à résoudre.

1) Le modèle HYDROTEL sous-estime systématiquement le ruissellement printanier, ce qui limite l'application du modèle calé à la période estivale, soit de mai à octobre.
2) Incapable de tenir compte du drainage par tuyaux enterrés, le modèle HYDROTEL ne peut simuler efficacement les débits estivaux. À cause de cette lacune, on arrive difficilement à modéliser le débit et l'exportation des nutriments, transportés plus rapidement dans les drains de canalisations qu'autrement.
3) En raison de l'absence de station météorologique dans le bassin versant de la rivière Bras d'Henri, certains débits de crue et leurs effets risquent d'être passés inaperçus.
4) Dans les travaux de modélisation à venir, il faudrait prendre des mesures en bordure des champs pour caler les modèles de transport par écoulement. Pour le moment, on a procédé par évaluation, d'après les données de sortie du modèle QUAL2E à l'exutoire des bassins versants.
5) Dans la modélisation des impacts de l'implantation de bandes riveraines, on a utilisé des relations empiriques (coefficients de réduction) pour estimer la réduction des charges en sédiments, en phosphore, en azote et en pesticides en milieu terrestre et en rivière. On pourrait obtenir des résultats plus réalistes en couplant d'autres modèles à base physique au GIBSI.
6) Dans le scénario de semis direct (cultures de maïs), le modèle GIBSI ne tient pas compte du lessivage des nutriments associé à la décomposition des végétaux.



Modules et améliorations à apporter aux modèles

Les chercheurs ont utilisé le système GIBSI tel quel, à l'exception de quelques modifications mineures. Les études précédentes, réalisées dans le bassin de la rivière Chaudière, ont facilité la sélection de paramètres pour les bassins versants, tandis que les recherches en cours au Centre Eau-Terre et Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique ont amélioré la capacité générale de modélisation. L'expérience acquise a grandement profité à la présente étude d'EPBH dans le bassin versant des rivières Bras d'Henri et Beaurivage.

Deux innovations, l'ajustement de la superficie des UHRH à la taille approximative des fermes ou des champs et le couplage du modèle TransPath et du système GIBSI, se sont avérées très utiles. La réduction des UHRH à la taille des fermes a facilité l'échange de renseignements entre les groupes de modélisation hydrologique et intégrée. Comme nous l'avons vu, le modèle TransPath a permis aux chercheurs d'examiner les effets du broutage sur des terres adjacentes à un cours d'eau.

Prochaines étapes

En prévision de l'EPBH II, les auteurs de l'étude proposent les priorités suivantes :

1) Appliquer un modèle de bassin versant entièrement distribué dans les deux micro-bassins versants afin d'étudier les impacts des pratiques agricoles sur l'eau de surface et l'eau souterraine. Le modèle CATHY permettrait d'examiner les relations qui mettent en jeu l'eau souterraine.

2) Terminer la mise au point d'un prototype de système de modélisation économie-hydrologie intégrée incorporant des données mises à jour sur l'évaluation des biens et services environnementaux.

3) Terminer l'analyse des avantages environnementaux par rapport aux coûts à la ferme dans les bassins versants des rivières Bras d'Henri et Beaurivage.



Notes



Notes

